МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

IX Международная научно-техническая конференция

«НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В XXI ВЕКЕ»

(Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г.)

Том I

Материалы конференции

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

УДК 664; 621; 304; 338
ББК 31.392; 31.31; 36; 65; 74.58 Н61

IX Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (*Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г.*). Т. I: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 344 с.

ISBN 978-5-7577-0617-7
ISBN 978-5-7577-0618-4 (Т.1)

В сборнике представлены материалы конференции по следующим направлениям: низкотемпературная техника и системы низкопотенциальной энергетики, надёжность материалов оборудования биотехнологий и низкотемпературных систем, автоматизация процессов и производств, криогенная техника и технологии сжиженного природного газа (СПГ), системы кондиционирования и жизнеобеспечения, теплофизика и теоретическая тепло- и хладотехника, процессы и аппараты пищевых производств, пищевые и биотехнологии, промышленная экология и техносферная безопасность, экономика и управление производством, инновации цифровой экономики.

Сборник подготовлен при участии Комитета по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга и Международной академии холода.

Редакционная коллегия: И.В. Баранов, А.А. Малышев, А.В. Цыганков, О.Б. Цветков, С.А. Вологжанина, Л.А. Забодалова, В.С. Колодязная, Е.И. Верболоз, В.Л. Иванов, А.Ю. Баранов, А.В. Фёдоров, О.И. Сергиенко, В.Л. Василенок.

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО– становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019
© Авторы, 2019

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 664.64;664.644.51

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШНЕКОВОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МУЧНЫХ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ СМЕСЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.М. Бородулин, Д.В. Сухоруков, Д.К. Черкашина

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

e-mail: pioner_dias@mail.ru

Аннотация

В представленной работе рассмотрены вопросы, связанные с получением высококачественных смесей функционального назначения, используемые при приготовлении различных хлебобулочных изделий для спортсменов. Такие продукты должны быть сбалансированы по своему составу и содержать строго определенное количество полезных веществ: аминокислот, жиров, сложных углеводов, витаминов различных групп и минералов. Для обеспечения такого результата необходимо создание и организация процесса смесеприготовления с использованием аппарата непрерывного действия центробежно-шнекового типа. Приведен состав мучной хлебобулочной смеси функционального назначения. Рассмотрено влияние различных технологических параметров работы используемого оборудования на качество получаемой продукции. Приведено сравнение степени качества получаемых мучных хлебобулочных композиций на используемом на предприятиях аппарате с предложенной новой конструкцией смесителя.

Ключевые слова

Центробежно-шнековый смеситель, функциональные продукты питания, мучные хлебопекарные смеси, коэффициент неоднородности, качество смешивания, процесс смесеприготовления.

Функциональное питание является одним из главных источников полноценного функционирования организма человека в современных условиях. Продукты функционального назначения используют во многих сферах деятельности, одной из наиболее актуальных является спорт. В данной области особенно важно следить за своим рационом, который должен быть сбалансирован различными белками, жирами, углеводами, витаминами и минералами. К одному из важнейших условий получения функциональных продуктов питания относится производство смесей с заданным соотношением компонентов. Поэтому актуальной задачей является создание и организация процесса смесеприготовления с целью получения высококачественных композиций функционального назначения с заданным соотношением компонентов.

При создании высококачественных смесей используют различное оборудование: центробежные, вибрационные, барабанные, шнековые смесители и т.д.

Для получения мучных хлебопекарных смесей для спортсменов исследовали центробежно-шнековый смеситель. Его преимуществами по сравнению с другим

оборудованием является обеспечение высокой степени однородности композиций, относительно низкие энерго- и материалозатраты при соотношении смешиваемых компонентов 1:100 и выше.

При производстве мучных хлебопекарных смесей функционального назначения для спортсменов использовали следующее сырье: мука пшеничная хлебопекарная первого сорта по ГОСТ Р 52189-2003, мука пшеничная цельнозерновая (обойная) по ГОСТ Р 52189-2003, мука нутовая по ТУ 9293-009-89751414-10, мука ржаная хлебопекарная обойная по ГОСТ Р 52809-2007, мука гречневая по ГОСТ Р 31645-2012, отруби овсяные по ТУ 9295-001-85850409-2012, клейковина сухая (пшеничный глютен) по ГОСТ 31934-2012, молоко сухое по ГОСТ Р 52791-2007, кунжут по ГОСТ 12095-76, семя льна по ГОСТ 10582-76, лук репчатый сушеный по ГОСТ 7587-71, соль поваренная пищевая сорта «Экстра» по ГОСТ Р 51574-2000 и сахар-песок по ГОСТ 12572-93.

На первом этапе исследования необходимо определить степень влияния частоты вращения рабочего органа центробежно-шнекового смесителя на качество смешивания.

Для статистической оценки качества получаемых смесей из нее отобрали 30 одинаковых проб, объем которых превышал объем наименьшей по размеру частицы диспергируемой фазы, получающейся в процессе смешивания).

Полученные результаты проведения исследований представлены на рис. 1.

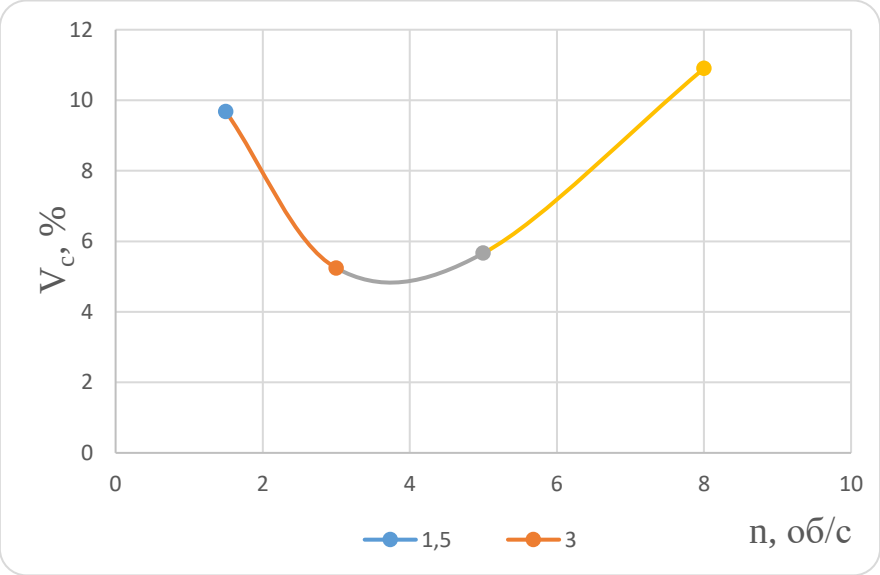


Рис. 1. График зависимости коэффициента неоднородности от частоты вращения рабочего органа центробежно-шнекового смесителя

Смешиваемые компоненты подавали в рабочую камеру аппарата через расположенный в верхней части корпуса люк загрузки. Попадая в направляющую воронку, компоненты ссыпались на перфорированный шнек. Пройдя через него, полученная композиция выходила из смесителя путем самопроизвольного ссыпания. Из полученной смеси обирали пробы массой 10 г. Пробы отбирали в различных точках композиции. Отбор проб проводили при прочих равных условиях. Пробы с минимальным и максимальным значениями концентрации ключевого компонента при расчетах не учитывали [3]. Каждую проба проходила процедуру взвешивания на электронных весах, точность взвешивания которых до 0,005 г. Кроме этого, в каждой пробе подсчитывали отдельное количество частиц ключевого компонента [2]. Его отношение к массе исследуемой пробы выражало концентрацию ключевого компонента получаемой смеси. Далее, используя полученную величину, проводили

оценку однородности смеси путем вычисления коэффициента вариации (неоднородности) [1].

Из представленного выше рис. 1 видно, что рациональная частота вращения шнека составляет 3…5 об/с. В данном диапазоне получается смесь с наименьшим коэффициентом неоднородности (*Vc* = 5%)

На втором этапе исследования определили степень влияния соотношения сыпучих компонентов на качество их смешивания в центробежно-шнековом смесителе [1].

Полученные результаты проведения эксперимента представлены на рис. 2.

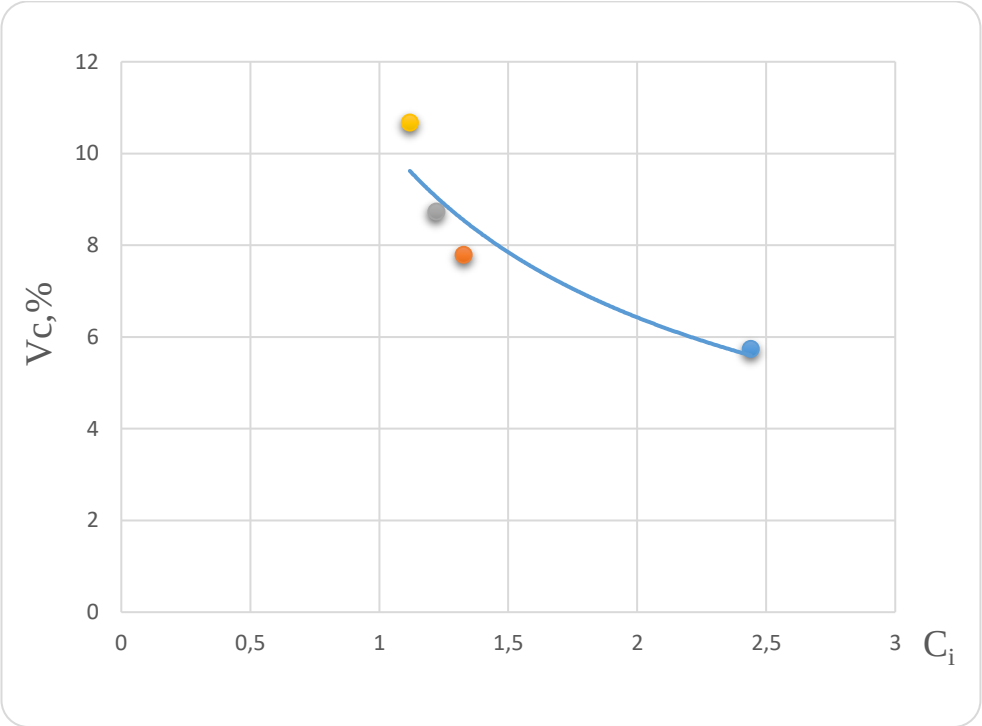


Рис. 2. График зависимости коэффициента неоднородности от концентрации частиц ключевого компонента в смеси

Анализируя график полученной зависимости видим, что при сокращении концентрации основного компонента в пробе коэффициент неоднородности увеличивается, т.е. качество процесса смешивания ухудшается. Поэтому для получения композиций хорошего качества концентрация основного компонента в пробе должна находиться в диапазоне от 2% до 10%.

На третьем этапе исследований получили мучные хлебобулочные смеси функционального назначения на базовой и новой конструкциях смесителя. В качестве базовой конструкции использовали центробежный смеситель непрерывного действия, используемого на пищевых предприятиях для получения хлебопекарных композиций.

Исследования проводили на новом центробежно-шнековом смесителе с перфорированным шнеком и базовом смесителе по заданной рецептуре [4]. Полученные пробы подвергали химическому анализу по количеству основного компонента (поваренной соли) по отношению к обшей массе смеси. Полученные смеси оценивали с помощью коэффициента неоднородности. Для сравнительного анализа полученного качества смеси использовали программу Statistica.

Сравнительный анализ работы центробежно-шнекового смесителя новой конструкции и базового смесителя представлены в таблице.

Таблица

Сравнение полученных коэффициентов неоднородности центробежно-шнекового смесителя и базового смесителя

Независимые переменные			Коэффициент неоднородности *Vc*, % для смесей:	
n, об/мин	Zo	Zв	Центробежно-шнековый смеситель	Базовый смеситель
500	4	2	5,94	7,15
500	4	4	8,63	8,88
500	8	2	9,31	10,12
500	8	4	9,22	10,75
900	4	2	5,31	7,44
900	4	4	3,79	5,19
900	8	2	12,01	14,41
900	8	4	11,86	14,05

Из таблицы видно, что наименьшие значения коэффициента неоднородности получены при использовании новой конструкции центробежно-шнекового смесителя. Минимальный коэффициент неоднородности составил 3,79% при использовании предложенной конструкции центробежно-шнекового смесителя при следующих технологических параметрах: частоте вращения рабочего органа 900 об/мин, n=900 об/мин, численности витков Zв=4 и численности отверстий на витках шнека Zo=4. Полученный *Vc* на новой конструкции центробежно-шнекового смесителя свидетельствует о высоком качестве получаемых мучных хлебопекарных смесей функционального питания для спортсменов.

Литература

1. Иванец В.Н. Новые конструкции центробежных смесителей непрерывного действия для переработки дисперсных материалов/ Иванец В.Н., Бакин И.А., Бородулин Д.М. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2003. № 4 (275). С. 94-97.
2. Дремучева Г.Ф. Исследование влияния мультэнзимных композиций ферментных препаратов на качество и степень сохранения свежести хлебобулочных изделий из пшеничной хлебопекарной муки высшего сорта / Дремучева Г.Ф., Зуева А.Г., Носова М.В., Костюченко М.Н. // Хлебопечение России. - 2018. – №4. – С.11-13.
3. Невская Е.В. Оптимизация рецептурного состава хлебобулочных изделий для спортивного питания/ Невская Е.В., Шлеленко Л.А., Бородулин Д.М. //Техника и технология пищевых производств. 2015. № 1 (36). С. 60-64.
4. Носова М.В., Технологические свойства МЭК-1 на основе отечественных ферментных препаратов в технологии хлеба из пшеничной муки с различными хлебопекарными свойствами // Носова М.В., Дремучева Г.Ф., Костюченко М.Н., Зуева А.Г., Цурикова Н.В. // Пищевая промышленность. – 2019. – №4. – С.76-77.

УДК 669.017: 621.791.051

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Т.И. Титова, Н.А. Шульган, А.С. Боровской

ООО «ТК«ОМЗ-Ижора», Санкт-Петербург, Россия

tatyana.titova@omzglobal.com

Аннотация

Представлены результаты исследований структурного состояния и свойств сварных соединений стали 2,25Cr-1Mo-V после различных режимов послесварочной термической обработки. Определены критические значения параметра Ларсена-Миллера, при которых в металле шва и ЗТВ обеспечивается отсутствие хрупких структур с твердостью выше 350 HV_{10}, склонных к воздействию водорода и образованию холодных трещин, и достигается требуемый для безаварийной эксплуатации уровень твердости не более 248 HV_{10}.

Ключевые слова

Нефтехимические реакторы, сварные соединения стали 2,25Cr-1Mo-V, параметры послесварочной термической обработки.

Введение

Как известно, современные нефтехимические реакторы являются высоконагруженными сосудами давления, к материалам которых предъявляются весьма жесткие требования по уровню служебных свойств – высокий уровень «холодной» и «горячей» прочности, хладостойкость с учетом эксплуатации при низких климатических температурах и другие. Для производства таких реакторов используются материалы системы легирования 2,25Cr-1Mo-V, склонные к трещинообразованию при сварке, поэтому технология их сварки и послесварочной термической обработки является сложной и требует знания процессов структурообразования.

При изготовлении корпуса нефтехимического реактора из 2,25Cr-1Mo-V стали все сварные соединения, работающие под давлением, подвергаются немедленной послесварочной термической обработке, которая подразделяется на низкотемпературную дегидрогенизационную термическую обработку (НДТО) и промежуточную термическую обработку (ПТО, высокий отпуск), а затем производится окончательная термическая обработка (ОТО, высокий отпуск) для формирования эксплуатационных свойств. Как правило, сварное соединение системы легирования 2,25Cr-1Mo-V проходит следующую последовательность изготовления: сварка → НДТО → технологические операции → ПТО – технологические операции → ОТО. При этом первый шов сборки корпуса реактора может подвергаться более чем десяти высоким отпускам, а замыкающий шов корпуса реактора только одному высокому отпуску ОТО.

Сведения о структурном состоянии металла сварного соединения в зависимости от параметров послесварочной термической обработки необходимы для определения наиболее оптимальных режимов ее проведения, позволяющих избежать образования холодных трещин и обеспечить требуемые эксплуатационные свойства.

Материалы и методика исследований

Для проведения исследований изготовлены способом автоматической сварки под флюсом опытные сварные соединения из 2,25Cr-1Mo-V стали. Использованные для этого сварочные материалы имели близкий к основному металлу тип легирования (таблице). После сварки сварные соединения подвергались термической обработке по следующим режимам: НДТО (P_{LM} = 13,0), ПТО (P_{LM} = 19,0-19,6), ОТО (P_{LM} = 20,3-21,6).

Таблица

Химический состав металла опытных сварных соединений

Зона сварного соединения	Содержание элементов, вес. %											
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Nb	P	S	As	Sn	Sb
Основной металл SA-336V F22V	0,13	2,38	1,01	0,28	0,48	0,07	0,01	0,006	0,002	0,004	0,003	0,001
Металл шва 2,25Cr-1Mo-V	0,10	2,49	1,08	0,35	0,86	0,17	0,02	0,007	0,003	0,003	0,007	0,0006

Полученные данные и обсуждение результатов

Выполнено исследование структурного состояния металла различных зон сварного соединения прямым методом с помощью оптического микроскопа при увеличениях до 1000 крат и косвенным методом, а именно определением уровня твердости сварного соединения методом Виккерса по ASTM E92. Влияние термических обработок на структуру и свойства металла сварного соединения выражали через параметр отпуска – параметр Ларсена – Миллера (P_{LM}). Параметр Ларсена-Миллера (P_{LM}) рассчитывается по формуле [1]:

$$P_{LM} = TK(20+\lg\tau)\times10^{-3},$$

где ТК – температура выдержки в градусах Кельвина, τ - длительность отпуска, час.

Критерием приемлемости структуры металла сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали считали отсутствие выраженной коагуляции карбидов, которая ведет к резкому снижению прочностных и вязких свойств стали.

Как известно, бейнитная структура, характерная для метала сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали, оптимальна для обеспечения эксплуатационных свойств, в том числе высокого уровня низкотемпературной работы удара, предела прочности и текучести в состоянии ОТО [2]. Однако, образующаяся в процессе сварки бейнитная структура характеризуется высокой твердостью - более 350 HV_{10}, что указывает на ее высокую чувствительность к воздействию водорода, а значит, и к образованию холодных трещин [2]. Очевидно, параметры ПТО в процессе изготовления изделия должны обеспечить получение твердости не более 350 HV_{10} во всех зонах сварного соединения. Для снижения склонности металла корпусов нефтехимических реакторов к образованию трещин во время эксплуатации под действием сероводородсодержащей среды, находящейся при высокой температуре и давлении, необходимо обеспечить уровень твердости металла сварных соединений не более 248 HV. Это требование внесено во все типовые спецификации на изготовление корпусов современных нефтехимических реакторов.

В настоящем исследовании установлено, что структура металла шва и ЗТВ сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали во всех термических состояниях представлена бейнитом с различным содержанием, распределением и составом карбидной фазы. ЗТВ имеет мелкозеренную структуру, металл шва состоит из участков крупнокристаллитной и мелкозеренной структуры. На рисунке 1 на примере металла

шва показано изменение структуры при увеличении величины параметра отпуска P_{LM}. После термической обработки с параметром отпуска P_{LM} = 13,0 (350°С) структура металла шва и ЗТВ близка к исходной (после сварки), а значит, обладает сходными свойствами. Увеличение температурно-временных параметров отпуска до P_{LM} = 19,3 и выше сопровождается выделением карбидов, увеличением их размеров и количества и коагуляцией по границам зерен (рис.1 б, в), что должно приводить к снижению временного сопротивления металла и его длительной прочности. Отпуск с P_{LM} значительно выше 21,0 нецелесообразен, так как ведет к интенсивной коагуляции карбидов, а при P_{LM} более 21,6 к растворению мелких и образованию крупных карбидов (рис. 1 г).

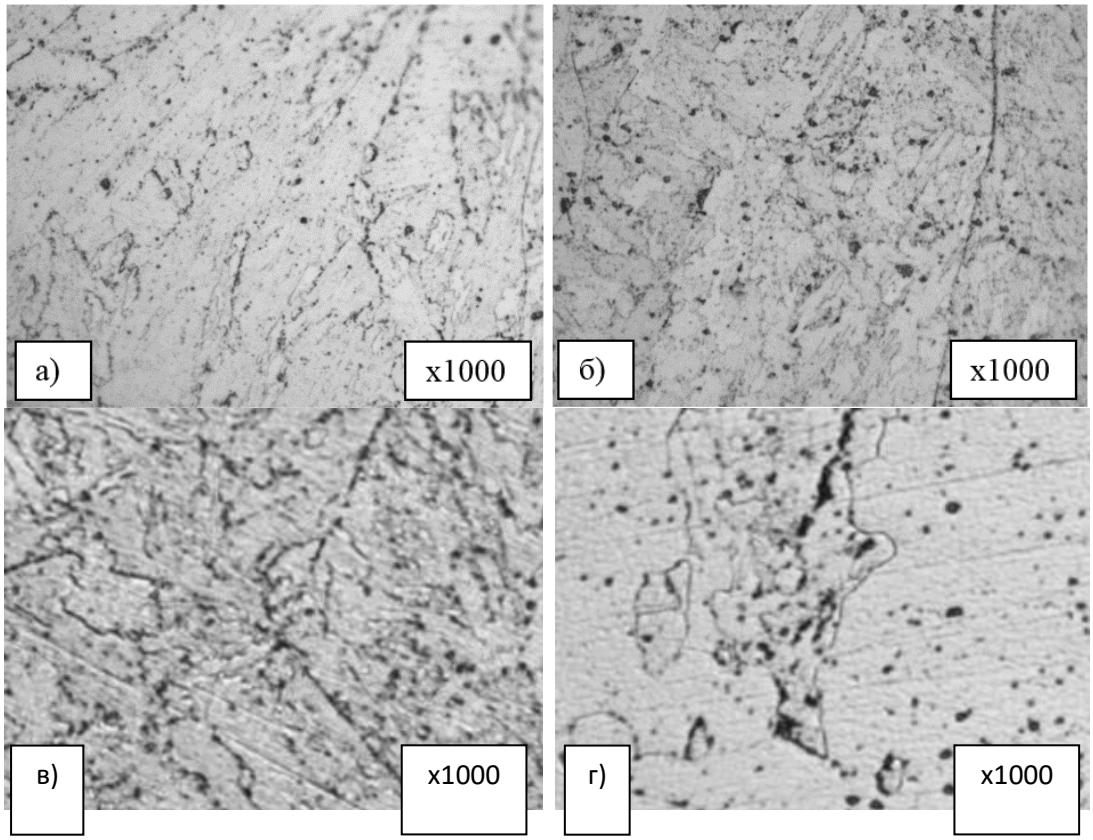


Рис. 1. Микроструктура металла шва после различных послесварочных термических обработок: а) 13,0 P_{LM} (350°С), б) 19,3 P_{LM}, в) 20,3 P_{LM}, г) 21,6 P_{LM}.
Травление выполнено 4% спиртовым раствором HNO_3

Изменения уровня твердости сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали оценивали в состоянии после сварки и после проведения отпусков с P_{LM} = 13,0 – 20,6. Результаты определения твердости в зависимости от параметра отпуска P_{LM} представлены на рис. 2.

В результате исследований установлено, что в состоянии после сварки (до термической обработки) уровень твёрдости сварного соединения составил в металле шва - до 398 HV, в металле ЗТВ - до 397 HV. Высокие значения твердости в металле шва и ЗТВ непосредственно после сварки указывают на наличие в этих зонах сварного соединения хрупких структур, склонных к трещинообразованию. При этом исходный уровень твердости термоулучшенного основного металла достаточно низок, он не превышает 250 HV_{10} и впоследствии, при увеличении P_{LM} до 20,2 равномерно снижается до 220 HV_{10}.

После НДТО с P_{LM} = 13,0, выполненной при 350°С, непосредственно после сварки, уровень твёрдости сварного соединения близок к исходному (послесварочному)

уровню и составляет в металле шва - до 374 HV_{10}, в металле ЗТВ - до 387 HV_{10}, что соответствует наличию хрупких структур, склонных к трещинообразованию в присутствии водорода. Эти данные предполагают большую вероятность образования трещин именно в металле шва или ЗТВ, где твердость превышает критический уровень 350 HV_{10}. Таким образом, НДТО сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали применяемая непосредственно после сварки, для удаления водорода, не оказывает существенного влияния на снижение твердости и может быть использована только при обеспечении низкого исходного уровня водорода в металле шва и ЗТВ.

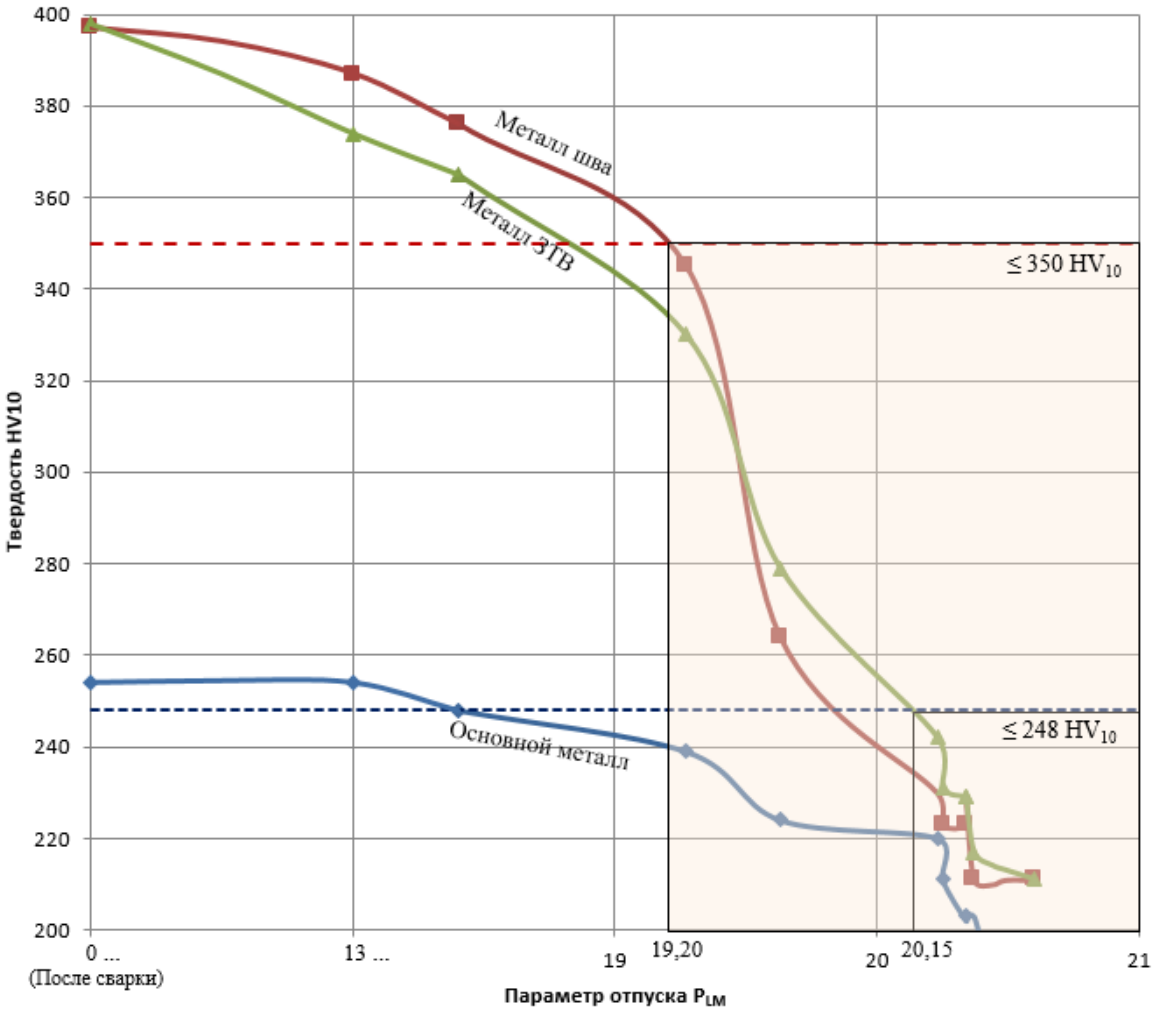


Рис. 2. Твердость различных зон сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в различных термических состояниях

Согласно представленным на рисунке 2 данным для снижения твердости ниже критического значения 350 HV_{10} и подтверждения отсутствия хрупких структур в металле сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, параметр отпуска P_{LM} должен быть не менее 19,2 (рис. 2). Увеличение параметра отпуска P_{LM} до 19,6 приводит к более значительному снижению уровня твердости: в металле шва - до 279 HV_{10}, в ЗТВ – до 264 HV_{10}.

Тем не менее, отпуск с параметром P_{LM} до 19,6 не позволяет достичь требуемого для бездефектной эксплуатации уровня твердости сварного соединения – не более 248 HV_{10}. В соответствии с графическим представлением зависимости «параметр отпуска P_{LM} - твердость» для обеспечения твердости сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали ниже 248 HV_{10} необходимо выполнить отпуск с параметром P_{LM} > 20,15.

Реализация опытного режима послесварочной термической обработки с параметром отпуска P_{LM} = 20,2 при температуре 695°С привела к уменьшению твердости металла сварного соединения до 242 HV_{10}, что близко к предельно допустимым значениям.. Однако, после отпуска с параметром P_{LM} = 20,2 перепад твердости по сечению сварного соединения достигает 50 HV_{10}, что указывает на возможность структурных напряжений и неравномерность характеристик прочности. Очевидно, температуру ОТО следует увеличить. Применение отпуска с температурой выдержки 700°С (P_{LM} = 20,3) показало, что он не только более эффективно, чем отпуск при 695°С (P_{LM} = 20,3), снижает уровень твердости сварного соединения (до не более 236 HV_{10}), но и обеспечивает меньший перепад твердости по сечению сварного соединения - 38 HV_{10}. Таким образом, режим ОТО с температурой 700°С , соответствующий P_{LM} не менее 20,3, следует считать достаточным для обеспечения требуемого уровня твердости сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали не более 248 HV_{10}.

Заключение

В результате выполненных исследований сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали установлено, что отсутствие в металле шва и ЗТВ хрупких структур с твердостью выше 350 HV_{10}, склонных к воздействию водорода и образованию холодных трещин, обеспечивается при $P_{LM} \geq 19{,}20$. Гарантированное получение требуемого для эксплуатации равномерного уровня твердости не более 248 HV_{10} возможно при проведении высоких послесварочных отпусков, температура и продолжительность которых превышают 20,3 P_{LM}. Установлено, что отпуск с P_{LM} значительно выше 21,0 нецелесообразен, так как ведет к интенсивной коагуляции карбидов, а следовательно, к снижению прочностных свойств. Установленные ограничения значений параметра отпуска P_{LM} могут служить основой при разработке температурно-временных параметров послесварочной термической обработки сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали для гарантированного отсутствия в них холодных трещин с целью повышения безопасности и надежности материалов таких сосудов давления, как корпуса нефтехимических реакторов, эксплуатирующихся в регионах с низкими климатическими температурами.

Литература

1. Larson F.R. & Miller J. Transactions ASME. – Vol. 74, 1952. – P. 765-771.
2. Гривняк И. Свариваемость сталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 215 с.

УДК612.395.6

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ НЕИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Д.А. Бараненко[1], Л.А. Надточий[1], В.Н. Беспалов[1,2], Ю.О.Федотова[1], И.А. Шестопалова [1] А.Ю. Чечеткина[1], А.И. Лепешкин [1], В.С. Ильина[1], Е.А. Рогозина[1]

1 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
2 – НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова, пос. Песочный, Санкт-Петербург, Россия

denis.baranenko@itmo.ru

Аннотация
Питание – один из основных факторов риска развития неинфекционных заболеваний, таких как онкологические, сердечно-сосудистые и хронические респираторные заболевания, сахарный диабет и возрастные нейродегенеративные заболевания. Существуют проблемы получения адекватного количества важных факторов питания в виду различных причин, таким образом, необходимо использование в составе регулярных рационов функциональных пищевых продуктов, восполняющих эту нехватку и обладающих профилактическими свойствами. В качестве природного источника биологически активных ингредиентов исследовался Лабазник вязолистный. Разработан способ инкапсулирования спиртовых и водных экстрактов лабазника для использования в составе сухих пищевых смесей. Также авторами проведены исследования функционального мясного продукта (паштет) с использованием разработанных инкапсулированных экстрактов. Внесение инкапсулированных экстрактов не приводило к ухудшению органолептических показателей и способствовало обогащению продукта флавоноидами и салицилатами, обладающими онкопротекторными свойствами. Установлен профилактический эффект инкапсулированных экстрактов и функционального мясного продукта в отношении рака предстательной железы. Кроме того, авторами предложены варианты смесей для молочных, кондитерских и рыбных продуктов с использованием инкапсулированных фитостеринов, витамина Д3, омега-3 жирных кислот и экстракта полипренолов. В зависимости от состава смеси были получены данные о профилактическом эффекте ингредиентов и функциональных продуктов с их применением в отношении новообразований молочной железы и нейродегенеративных заболеваний.

Ключевые слова
Функциональное питание, биологически активные вещества, таволга, фитостерины, холекальциферол, омега-3.

Функциональные пищевые продукты являются глобально признаваемой тематикой исследований и разработок в современной науке о пище. Понимание этого термина продолжает изменяться с развитием технологий и представлений о составе пищи и её влиянии на организм человека. Появление функциональных пищевых продуктов, с одной стороны, направлено на облегчение повседневного соблюдения рационального питания, с другой, осуществляет попытку предотвращения серьёзных проблем со здоровьем, связанных с различными заболеваниями.

Дело в том, что даже правильные сбалансированные, можно сказать, идеальные традиционные рационы, присущие большинству территорий, не обеспечивают организм дополнительными возможностями для защиты от нейродегенеративных, онкологических, инфекционных заболеваний. Ситуация осложняется ещё и тем, что

рационы имеют часто имеют сезонную и климато-географическую разбалансированность, которую крайне сложно учесть и компенсировать. В материковых областях сказывается нехватка жирной морской рыбы, в большинстве регионов люди ежедневно не употребляют необходимого количества фруктов и овощей, а в северных регионах в зимнее время, привозное растительное сырьё обладает пониженной биологической ценностью. Уменьшение подвижности населения при подавляющей сидячей работе и использованию транспорта сказывается на том, что рацион, обеспечивающий с помощью обычных продуктов достаточную биологическую ценность, становится избыточным по калорийности, что является риском развития ожирения, сердечно-сосудистых и эндокринных заболеваний, рака кишечника. В окружающей человека среде появляются всё новые антропогенные факторы, обладающие токсическим и канцерогенным действием, что также требует соответствующей компенсации за счёт питания. Увеличение продолжительности жизни ставит новые задачи по повышению качества жизни возрастного населения, обеспечению её активности, предотвращению неинфекционных заболеваний и др. К основным типам неинфекционных заболеваний относятся: онкологические, сердечно-сосудистые и хронические респираторные заболевания, сахарный диабет и возрастные нейродегенеративные заболевания. На первые четыре группы приходится более 80 % смертности от неинфекционных заболеваний [1]. При этом неправильное питание относится к одному из основных факторов риска развития неинфекционных заболеваний.

В России на уровне государственных стандартов введены термины: натуральный функциональный пищевой продукт: Функциональный пищевой продукт, употребляемый в пищу в переработанном виде, содержащий в своем составе естественные функциональные пищевые ингредиенты исходного растительного и (или) животного сырья в количестве, составляющем в одной порции продукта не менее 15 % от суточной потребности. функциональный пищевой ингредиент: Живые микроорганизмы, вещество или комплекс веществ животного, растительного, микробиологического, минерального происхождения или идентичные натуральным, обладающие способностью оказывать научно обоснованный и подтвержденный эффект на одну или несколько физиологических функций, процессы обмена веществ в организме человека при систематическом употреблении содержащего их функционального пищевого продукта.

Различные исследования, в том числе исследования запросов в поисковых системах в интернете, демонстрируют многократное увеличение интереса к здоровому питанию и функциональным пищевым продуктам за последние 12 лет. При этом функциональные пищевые продукты также постепенно усложняются.

На сегодняшний день научно обоснованы и показаны биологические эффекты значительного количества факторов питания. При этом одни и те же факторы могут отвечать за разное воздействие, например, пищевые волокна связывают со снижением уровня усвоения жиров, регулированием аппетита, поддержанием уровня глюкозы в крови и т.д. На основании клинических исследований и мета-исследований определены основные вещества, регулирующие метаболизм углеводов, жиров, ответственные за антиоксидантное воздействие, эффекты поддержания деятельности сердечно-сосудистой системы, желудочно-кишечного тракта, зубной и костной ткани, иммунной системы и другие. Таким образом, понимание роли питания в формировании здоровья постоянно детализируется и дополняется.

Однако получить адекватное количество даже самых важных факторов питания по-прежнему очень трудно. Например, употребление пищи, богатой омега-3 полиненасыщенными жирными кислотами связывают с большим количеством положительных долгосрочных эффектов, в частности поддержанием уровня инсулина и глюкозы в крови, сохранением тонуса и проходимости кровеносных сосудов,

антитромботическим действием – по сути дела, жизненно важными для каждого человека свойствами [2]. В России установлена рекомендуемая суточная норма потребления омега-3 жирных кислот в 1 г. При этом, если посмотреть на основные источники этого компонента пищи, становится очевидным, что подавляющее большинство населения живёт с их постоянной нехваткой в рационе. Это может быть одним из основных факторов, который делает сердечно-сосудистые заболевания столь значимой причиной смертности населения.

На сегодняшний день из всего биоразнообразия сырья животного и растительного происхождения в производстве пищевой продукции задействована лишь малая его часть. Вместе с тем многие неиспользуемые доступные сырьевые источники обладают уникальными биологически активными комплексами соединений, которые обладают огромным нераскрытым потенциалом. Прогресс в области методов исследования химического состава позволяет быстрее и точнее анализировать происходящие в сырье трансформации, учитывать сезонность накопления биологически активных веществ, разрабатывать технологии эффективного выделения субстанций. Для большинства новых биологически активных соединений обязательным этапом являются доклинические исследования на лабораторных животных и клинические исследования, выполняемые профессиональными медиками.

Немаловажным аспектом является стоимость разработанной продукции, так как даже при наличии подтверждённых существенных эффектов, функциональный пищевой продукт в два или три раза дороже аналогичного традиционного продукта останется строго нишевым, или вообще не будет реализован в промышленности. Кроме эффекта масштаба, когда увеличение производительности снижает себестоимость, доступны и разрабатываются другие решения.

Конечно, важно не только произвести полезный продукт, но и сохранить его. Это касается, как сохранения функциональных свойств, так и обеспечения безопасности продукции. К тому же, увеличение сроков годности связано с логистическими издержками и вообще прямо пропорционально шансам дойти до конечного потребителя.

По всем приведенным задачам в Университете ИТМО проводятся соответствующие исследования [3 – 5].

В качестве природного источника биологически активных ингредиентов нашим коллективом исследуется произрастающий практически на всей территории западной России и Европы Лабазник вязолистный. Лабазник, или Таволга, известен своим использованием в традиционной медицине, поэтому логичным было осуществить исследование его химического состава с целью обнаружения ценных компонентов. Для этих целей исследовалось влияние водной и спиртовой экстракции на содержание флавоноидов, фенолокислот и танинов. С помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии установлены содержания основных компонентов этих фракций, обоснованы параметры выделения. Также во всех образцах были проведены исследования показателей безопасности – токсинов и радионуклидов, в соответствии с требованиями нормативной документации. Наиболее биологически ценные варианты экстрактов использовались в доклинических исследованиях с применением токсической (этилнитрозмочевина) и радиационно индуцированной (4 Гр) модели канцероматоза у крыс. В обеих моделях группы животных, получавшие перорально до и после канцерогенного воздействия, биологически активные ингредиенты, выделенные из таволги, демонстрировали достоверное снижение в 1,2-1,5 раза число случаев образования опухолей у крыс. При этом достоверное уменьшение количества опухолей ЦНС составило от 2,0 до 3,1 раз [6]. Вместе с тем, экстракты лабазника не демонстрировали никакого токсического воздействия на организм, что также подтверждается данными о многолетнем использовании препаратов на основе этого растения. Таким образом, в перспективе экстракты лабазника могут применяться в

составе функциональных пищевых продуктов в постоянных рационах питания для предотвращения негативного воздействия канцерогенных факторов окружающей среды на организм человека, либо в случае попадания человека в группу риска по определенному виду онкологических заболеваний.

Коллективом авторов был разработан способ инкапсулирования экстрактов лабазника для использования в составе сухих пищевых смесей для производства функциональных продуктов питания. Изготовление наноинкапсулированных биологически активных ингредиентов таволги включало основные этапы: подготовка экстрактов; смешивание экстрактов с раствором мальтодекстрина; получение инкапсулированных экстрактов; сушка микро- и нанокапсулированных экстрактов и получение стабильных нанокапсул; фасовка и хранение. Использование сканирующего электронного микроскопа позволило оценить фракционный размер нано- и микрокапсул экстракта лабазника с размером частиц от 90 нм до 5 мкм. По результатам доклинических исследований определен профилактический эффект объектов испытаний в отношении в отношении злокачественного новообразования предстательной железы. Для экспериментальных групп, получавших корм с наноинкапсулированными биологически активными ингредиентами, профилактический эффект составил от 22 до 34 %.

Также проведены исследования функционального мясного продукта с использованием разработанных инкапсулированных экстрактов. Объектом исследования выбран паштет, изготовленный по разработанной авторами рецептуре, включающей мясо бедренной части, мясо механической обвалки, жир-сырец и кожу цыплят-бройлеров, бульон, лук репчатый пассерованный и комплексную функциональную сухую смесь, содержащую молоко сухое обезжиренное, клетчатку пшеничную, крахмал модифицированный, моно- и диглицериды жирных кислот, соль поваренную пищевую, микро- и нанокапсулы экстрактов перца черного, имбиря и таволги. Выработка паштета осуществлялась горячим способом. Внесение в паштет функциональной комплексной смеси не приводило к ухудшению органолептических показателей и способствовало обогащению продукта флавоноидами и салицилатами, обладающими онкопротекторными свойствами. Профилактический эффект разработанного функционального мясного продукта был также подтверждён в доклинических исследованиях.

Кроме функциональных смесей с экстрактом лабазника были также предложены варианты смесей для молочных, кондитерских и рыбных продуктов с использованием инкапсулированных фитостеринов, витамина Д3, омега-3 жирных кислот и экстракта полипренолов. В зависимости от состава смеси были получены данные о профилактическом эффекте ингредиентов и функциональных продуктов с их применением в отношении новообразований молочной железы и нейродегенеративных заболеваний.

Таким образом, инкапсулированные биологически активные вещества могут быть использованы в составе различных функциональных пищевых продуктов для обеспечения профилактических свойств в отношении широко распространённых неинфекционных заболеваний.

Благодарность: Работа финансово поддержана Министерством науки и высшего образования в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Мероприятие 1.4., уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI58117X0020.

Литература

1. Дорофеев С.Б., Бабенко А.И. Национальные стратегии формирования здорового образа жизни населения // Здравоохранение Российской Федерации. – 2015. – Т. 59. – №. 6. – С. 44-47.
2. Bhagat U., Das U. N. Potential role of dietary lipids in the prophylaxis of some clinical conditions // Archives of medical science: AMS. – 2015. – Т. 11. – №. 4. – С. 807-818.
3. Baranenko D.A., Kolodyaznaya V.S., Zabelina N.A. Effect of composition and properties of chitosan-based edible coatings on microflora of meat and meat products //Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria. – 2013. – Т. 12. – №. 2. – С. 149-157.
4. Бараненко Д.А. Технология мясных продуктов из биомодифицированного сырья //Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2013. – №. 1.
5. Васильева И.Н., Беспалов В.Г., Бараненко Д.А. Радиопротективные и апоптотические свойства комбинации альфа-токоферола ацетата и аскорбиновой кислоты // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2016. – Т. 161. – №. 2. – С. 208-211.
6. Bespalov V.G., Alexandrov V.A., Vysochina G.I., Kostikova V.A., Baranenko D.A. The inhibiting activity of meadowsweet extract on neurocarcinogenesis induced transplacentally in rats by ethylnitrosourea //Journal of neuro-oncology. – 2017. – Т. 131. – №. 3. – С. 459-467.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕХНИКА И СИСТЕМЫ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.1.016

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ

Д.З. Байрамов, Л.В. Галимова

Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия

bairamov.dzhamil@mail.ru

Аннотация

Оптимизация сложных энергосберегающих систем есть процесс вариации структуры и параметров системы с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат с учетом технических и ресурсных ограничений, обеспечение защиты окружающей среды, создание условий эксплуатационной надежности и невысокой стоимости ремонта.

В действующих энергосберегающих системах проблема оптимизации сводится к вариации рабочих параметров энергетической системы в целом. Решение данной проблемы опирается на возможности эксергоэкономического метода анализа.

Существуют разные методики эксергоэкономической оптимизации сложных энергетических систем. В данной работе рассмотрены 3 основных метода эксергоэкономического анализа - это метод В.М. Бродянского, метод Д. Тсатсарониса и эксерготопологический метода анализа энергосберегающих систем.

Ключевые слова

Эксергия, эксергоэкономический метод, оптимизация, энергосберегающая система, деструкция эксергии, стоимость единицы эксергии.

Эксергетический метод, совмещающий в себе первое и второе начало термодинамики и имеющий в качестве сравнения окружающую среду, актуален в настоящее время для анализа энергопреобразующих систем. Основы эксергетического метода были заложены еще в 30-х годах XX века Дж. Гиббсом, Ж. Гюи [5], А. Стодолой и другими. Впоследствии эксергетический метод был развит в работах В.М. Бродянского [1], Я. Шаргута, Р. Петелы [4], Дж. Тсатсарониса [2] и других ученых.

Эксергоэкономика есть объединение эксергетического метода и экономической оптимизации для комплексного анализа энергосберегающих систем. На основе эксергетического метода анализа термин энергосбережение можно переформулировать как процесс сохранения работоспособной энергии. Основная задача эксергоэкономического анализа или как его часто называют термоэкономического - есть исследование степени совершенства процессов энергопреобразования энергии и определение возможных границ его повышения.

Объектом исследования является система, включающая в себя парогазовую установку ПГУ-110 с газовой турбиной LM6000 и абсорбционную бромистолитиевую холодильную машину HSA-1157, обеспечивающую эффект энергосбережения,

используемая в энергетической системе "ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго" в городе Астрахань.

Впервые методика эксергоэкономической оптимизации в полном виде была приведена В.М. Бродянским [1]. Она основана на определении целевой функции, учитывающей взаимодействие потоков и потерь эксергии, стоимостных показателей, оценки стоимости единицы эксергии по каждому участку преобразования энергии.

Для наглядного представления изменения величины целевой функции по ходу технологического процесса применяется совместная диаграмма эксергетических и стоимостных показателей представленная на рис. 1.

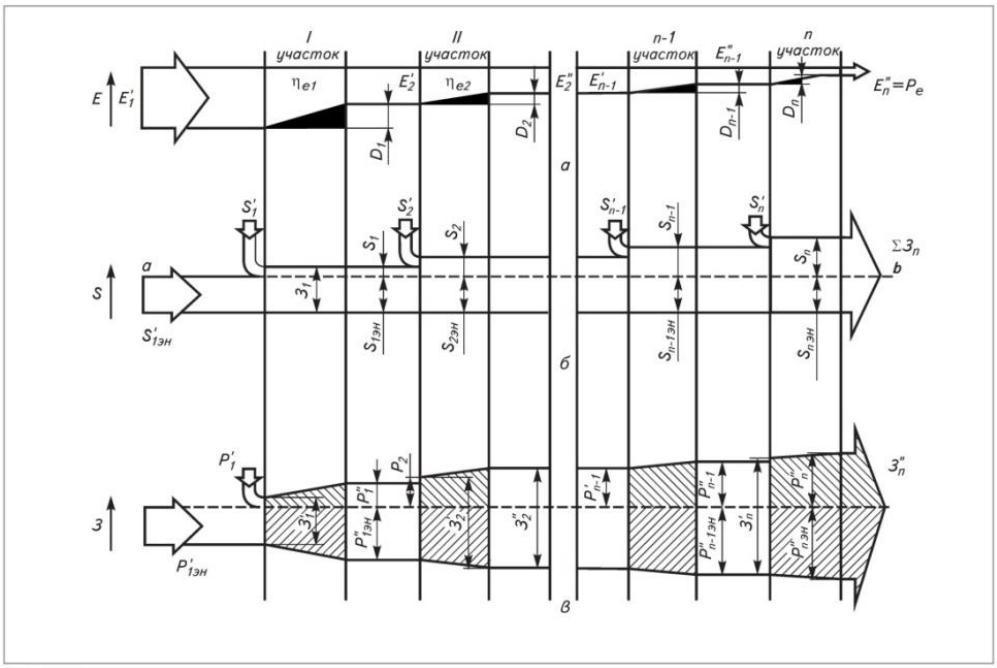


Рис. 1. Диаграмма эксергетических и стоимостных показателей
а) – диаграмма Грассмана; б) – диаграмма экономических затрат;
в) – диаграмма стоимости единицы эксергии

Аналитически изменение целевой функции, показанной на рис. 2, можно представить в виде

$$З^{ТЭ} = (\sum S_{ЭН} + \sum S_{НЭН})/P_e, \quad (1)$$

где: $\sum S_{ЭН}$ – суммарные неэнергетические затраты, $\sum S_{НЭН}$-суммарные энергетические затраты, P_e- эксергетическая оценка получаемого продукта.

Эксергетическая оценка получаемого продукта на рис. 1 (а) представлена диаграммой Грассмана. Она учитывает потоки и потери эксергии в определенном технологическом процессе. В общем виде уравнение, отражающее эксергетический баланс системы, можно представить как:

$$D=\sum E' - (\sum E'' + \Delta E), \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{\sum E'' + \Delta E}{\sum E'}, \quad (3)$$

Здесь ΔE – приращение эксергии системы между начальной и конечной точками процесса. D – потери эксергии от необратимости в системе.

Диаграмма экономических затрат показанная на рис. 1 (б) делится на две составляющих затрат на производство продукции: энергетические $S_{ЭН}$ представленные полосой под линией *ab* и неэнергетические $S_{НЭН}$ над линией *ab*.

Энергетические затраты зависят от термодинамических характеристик потоков в системе. Они учитывают стоимость всех поток эксергии вещества и энергии, поступающих в систему. Неэнергетические затраты учитывают отчисления с капитальных затрат такие как амортизационные и т.д.

Таким образом, общие экономические затраты энергетической системы есть сумма энергетической и неэнергетической частей экономических затрат.

$$\sum З = (\sum S_{ЭН} + \sum S_{НЭН}), \quad (4)$$

Третья диаграмма изображенная на рис. 1 (в) иллюстрирует изменение целевой функции. На диаграмме видно что по мере уменьшения эксергии в технологическом процессе в следствии необратимости стоимость единицы эксергии увеличивается. На это влияют в большей степени увеличение неэнергетических затрат.

На основе выше изложенного оптимизационной процедурой является минимизация целевой функции, учитывающей эксергию входящих и выходящих потоков в стоимостном выражении с учетом неэнергетических затрат.

Виктор Михайлович Бродянский внес большой вклад в развитие эксергоэкономической оптимизации, приложенной к энергетическим системам для решения поставленной задачи оптимизации.

Несмотря на то, что эксергоэкономический метод нашел признание для оптимизации энергетических систем, он медленно внедряется в практику, что объясняется трудностями в распределении неэнергетических затрат между потоками продуктов в сложных системах.

Джордж Тсатсаронис в работе "Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы" [2] представил развитие метода оптимизации, в большей степени связанного с проектированием технических систем. В книге последовательно рассмотрены основные положения эксергетического и эксергоэкономического анализа, формируются теории эксергетической стоимости с использованием в различных задачах анализа и оптимизации работоспособных проектов.

В работе используются ряд новых терминов, которые могут быть использованы в методике оптимизации действующих энергетических систем. В первую очередь нужно отметить понятие "термодинамическая неэффективность".

Термодинамическую систему можно охарактеризовать тремя источниками необратимости – механическая, тепловая и химическая, которые на практике могут рассматриваться как термодинамическая неэффективность.

Термодинамическая неэффективность взаимосвязана с термодинамической эффективностью, так как одно значение определяет другое. В настоящее время элементы технических систем практически достигли предела термодинамической эффективности и дальнейший процесс совершенствования может быть проведен только за счет снижения термодинамической неэффективности.

В отличие от В.М. Бродянского в данной работе эксергетический анализ оперирует такими понятиями как топливо, продукт, потери эксергии и деструкция эксергии. Топливом считается эксергетический поток, входящий в элемент системы, а продукт соответственно эксергетическим потоком, выходящим из элемента системы и поступающим в следующий компонент, или являющийся конечным продуктом системы. Потери эксергии можно наблюдать при взаимодействии элемента с окружающей средой, что так же было отмечено в работах В.М. Бродянского.

Новым понятием в эксергетическом анализе является деструкция эксергии или разрушение (рассеивание) эксергии. Деструкция эксергии представляет собой численное значение термодинамической неэффективности, имеющее место в каждом элементе системы.

В современном эксергетическом анализе, эксергетический баланс имеет вид,

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{L,k} + (E_D^{AV} + E_D^{UN}), \quad (5)$$

где: $E_{P,k}$ – эксергия продукта, $E_{F,k}$ – эксергия топлива, $E_{L,k}$ – абсолютные потери эксергии, E_D^{AV}, E_D^{UN} – устранимая и неизбежная часть деструкции эксергии.

Эксергетическая эффективность

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k} - E_D^{UN}} = 1 - \frac{E_D^{AV} + E_{L,k}}{E_{F,k} - E_D^{UN}}, \quad (6)$$

Эксергетическая эффективность является единственным критерием, который однозначно характеризует эффективность компонента с точки зрения термодинамики и позволяет сравнивать подобные элементы работающих в пределах одной системы.

Экономическая составляющая анализа делится на две составляющих стоимости системы – эксергетические, включающие стоимость капитальных инвестиций, и неэксергетические, учитывающие расходы на обслуживание. Сумма этих затрат дает общую стоимость компонента в системе.

Анализ стоимости единицы эксергии проводится на основе эксергоэкономических критериев:

Цена эксергии продукта,

$$\mathrm{c}_{\mathrm{P},k} = \frac{\mathrm{C}_{\mathrm{P},k}}{E_{P,k}}, \quad (7)$$

Стоимость, связанная с деструкцией эксергии,

$$\mathrm{C}_{D,k} = \frac{\mathrm{C}_{F,k}}{E_{F,k}} \cdot (E_D^{AV} + E_D^{UN}), \quad (8)$$

Стоимость, связанная с потерями эксергии,

$$\mathrm{C}_{L,k} = \mathrm{c}_{F,k} \cdot E_{L,k}, \quad (9)$$

где: $\mathrm{C}_{F,k}$, $C_{\mathrm{P},k}$ – стоимость эксергии топлива и продукта.

Значение цены эксергии компонента системы зависит от положения этого компонента в системе и его связи с другими компонентами. Эксергоэкономический анализ в работе Д. Тсатсарониса сравнивает реальные источники стоимости в системе и показывает процессы ее формирования в пределах этой системы, позволяет определить оптимальную стоимость компонентов системы.

Несомненно, разделение деструкции эксергии на составляющие в работе Д. Тсатсарониса позволяет проводить более глубокий эксергетический анализ по сравнению с методикой, описанной В.М. Бродянским. Результаты эксергоэкономического анализа в работах Д. Тсатсарониса представляются в виде таблиц, которые часто сложно разобрать, в отличие от эксергоэкономической диаграммы разработанной В.М. Бродянским, которая иллюстрирует результаты анализа, что упрощает процесс понимания.

В работе Р.А. Амерханова [3] при решении оптимизации системы используется теория графов. Любая энергетическая система представляет собой совокупность физических компонентов, которые имеют связи (полюса) между собой. Каждый компонент имеет некоторую ветвь графа, которую называют полюсным графом этого компонента.

Различают четыре вида потоковых графов: параметрический потоковый граф (ППГ), материальный потоковый граф (МПГ), тепловой потоковый граф (ТПГ), и эксергетический потоковый граф (ЭПГ). Для решения задач оптимизации применяют ППГ и ЭПГ графы.

Структурные особенности графов имеют матричное представление [3].

На рис. 2 изображена схема абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины HSA-1157, которая входит в состав энергосберегающей системы ПГУ-АБХМ.

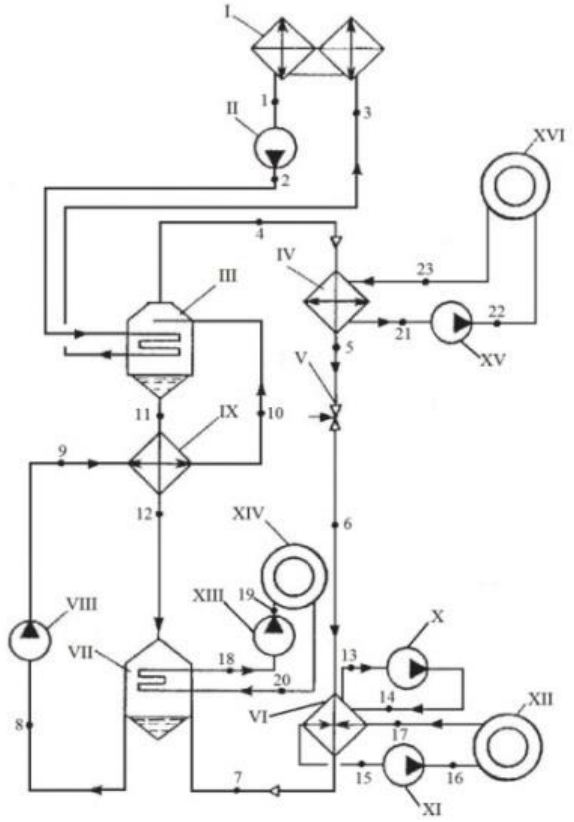


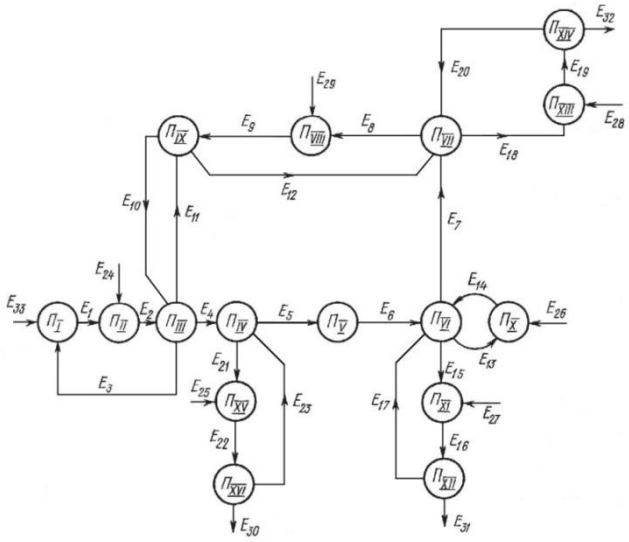
Рис. 2. Схема АБХМ HSA-1157
I - теплообменник ГПК; II - насос греющего источника; III - генератор; IV - конденсатор; V - дросселирующие устройство; VI - испаритель; VII - абсорбер; VIII - насос раствора; IX - теплообменник раствора; X - насос х.а.; XI - насос хладоносителя; XII - КВОУ; XIII, XV - насос охлаждающей воды; XIV, XVI – градирня.

В работе [3] приведен алгоритм термоэкономического анализа, который заключается в следующем:

1. необходимо построить соответствующий технологической схеме эксергетический граф и матрицу инциденций. Пример построения эксергетического потокового графа и матрицы инциденций для схемы рис. 2 (ЭПГ) представлен на рис. 3.

2. для всех компонентов системы определить входящие и выходящие потоки эксергии и степень их термодинамического совершенства.

3. рассчитать суммарные потери эксергии во всех компонентах системы



а

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	E29	E30	E31	E32	E33
I	-1		1																														1
II	1	-1																						1									
III		1	-1	-1						1	-1																						
IV				1	-1																-1		1										
V					1	-1																											
VI						1	-1						-1	1	-1		1																
VII							1	-1				1						-1		1													
VIII								1	-1																			1					
IX									1	-1	1	-1																					
X													1	-1												1							
XI															1	-1											1						
XII																1	-1													1			
XIII																		1	-1									1					
XIV																			1	-1											1		
XV																					1	-1			1								
XVI																						1	-1							1			

б

Рис. 3. Эксергетический потоковый граф (а) и матрица инциденций (б) для схемы АБХМ

Методика эксергоэкономического анализа основывается на работах Д. Тсатсарониса.

Преимуществом потоковых графов несомненно является их гибкость и разнообразие применения. Применение теории графов для решения оптимизационных задач позволяет получать большее количество вариантов критериев оптимизации. Однако такой метод находит большее применение при оптимизации проектируемых технических систем, что позволяет определять оптимальные размеры аппаратов, схему обвязки с наибольшей эффективностью и т.д.

Выводы

На основании проведенного сравнения установлено, что при исследовании проблемы оптимизации могут быть использованы все три приведенные методики, которые дополняют одна другую. При этом предполагается использовать их достоинства и проводить эксергоэкономическую оптимизацию по следующему алгоритму:

1. строится информационная модель технической системы;
2. строится параметрический потоковый граф (ППГ) и соответствующая матрица инциденций графа для данной системы;
3. строится эксергетический потоковый граф (ЭПГ) и соответствующая матрица инциденций графа для данной системы;

4. проводится расчет потоков и потерь эксергии, деструкции эксергии, эксергетическая эффективность каждого компонента и всей системы в целом;

5. определяются экономические показатели, такие как капитальные вложения, амортизационные отчисления, стоимость обслуживания и планового ремонта технической системы и.т.д.;

6. на основании проведенных расчетов строится эксергоэкономическая диаграмма описанная в работе В.М. Бродянского. Диаграмма Грассмана строится на основании расчета потоков и потерь эксергии. Экономическая диаграмма состоит из суммы эксергетической и неэксергетической стоимости компонентов технической системы, а третья диаграмма показывает цену единицы эксергии, которая является целевой функцией и определяется как отношение стоимости эксергии на общий поток эксергии в компоненте системы;

7. на основании полученных результатов в виде эксергоэкономической диаграммы с использованием имитационного моделирования проводится оптимизация, целью которой является минимизация целевой функции в большом интервале изменения рабочих параметров.

Литература

1. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К., Эксергетический метод и его приложения. Под редакцией Бродянского В.М. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
2. Дж. Тсатсаронис, Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. – Одесса: Негоциант, 2002. – 152 с.
3. Амерханов Р.А., Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
4. Шаргут Я., Эксергия [Текст]/ Шаргут Я., Петела Р. под редакцией Бродянского В.М. – М.: Энергия, 1968. – 288 с.
5. G. Gouy, Sur l'energie utilisable // Journal de physique. – 1889. – Vol. 118. – P. 501-512.

УДК 621.594

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

М.М. Данилов, О.С. Апицына

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

dmm@trumgame.ru

Аннотация
Рассматриваются различные способы расчета основных параметров процесса вымораживания диоксида углерода при расширении газовых смесей с различной концентрацией паров диоксида углерода в турбодетандере газовой холодильной машины. Проведено сопоставление полученных разными способами результатов расчета таких параметров, как конечная температура газовой смеси, удельное количество вымороженного диоксида углерода и степень его извлечения. Даны рекомендации по корректности использования инженерных способов определения параметров процесса вымораживания.

Ключевые слова
Диоксид углерода, вымораживание, турбодетандер, диаграмма i-d, теплота фазового перехода, газовая смесь.

Получение твердого диоксида углерода (сухого льда) вымораживанием паров CO_2 из газовых смесей в турбодетандере низкотемпературной газовой холодильной машины является одной из новационных технологий в низкотемпературной энергетике [1].

Газовый поток, расширяющийся в турбодетандере, представляет собой газовую смесь, компонентный состав которой обусловлен использованием тех или иных газовых сред, содержащих диоксид углерода [2, 3, 4]. В основном используются продукты сгорания топлива (дымовые газы) и отходящие газы известково-обжигательных или карбидных печей. Основными компонентами этих газовых сред на входе в турбодетандер являются диоксид углерода и азот. Ориентируясь на рассмотренные источники газовых сред, выбраны следующие объемные концентрации диоксида углерода в газовых смесях, поступающих в турбодетандер: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 (оставшийся объем занимает азот).

При расширении газовой смеси в турбодетандере происходит понижение как температуры смеси, так и температуры насыщения диоксида углерода, зависящей от падающего давления [5, 6]. Разница между этими температурами обозначается как степень переохлаждения потока, которая растет по мере понижения давления потока. При достижении определенной степени переохлаждения потока (критическое переохлаждение) начинается процесс кристаллизации паров диоксида углерода. При этом выделяется теплота процесса кристаллизации (десублимации), повышающая температуру газовой смеси и, соответственно, уменьшающая степень переохлаждения потока. В тот момент, когда температура потока газовой смеси повысится до температуры насыщения диоксида углерода, процесс кристаллизации (вымораживания) диоксида углерода из газовой смеси завершается. На выходе потока из турбодетандера, кроме газовой смеси с уменьшившейся концентрацией диоксида углерода, будут присутствовать кристаллы диоксида углерода (углекислотный снег).

К основным параметрам процесса вымораживания можно отнести удельное количество вымороженного диоксида углерода Δg_{co_2}, кг/кг, степень извлечения диоксида углерода (в твердом виде)

$$\frac{r_{co_2(\text{н})} - r_{co_2(\text{к})}}{r_{co_2(\text{н})}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $r_{co_2(\text{н})}$ – объемная концентрация диоксида углерода на входе в турбодетандер; $r_{co_2(\text{к})}$ – объемная концентрация диоксида углерода на выходе из турбодетандера,
а также температура газовой смеси на выходе из турбодетандера $T_{\text{к}} = T^{"}_{co_2(\text{к})}$ (температура насыщения диоксида углерода на выходе из турбодетандера).

Будем рассматривать два способа инженерных расчетов по определению результатов процесса вымораживания диоксида углерода, предложенных для изучения студентам, обучающимся по магистерской программе «Промышленные холодильные системы и тепловые насосы».

По первому способу параметры процесса вымораживания определяются с помощью диаграммы i-d для смеси азот-диоксид углерода [7]. Для заданной степени расширения потока $\pi_{\text{д}} = p_{\text{н}}/p_{\text{к}} = 1{,}818$, где $p_{\text{н}}$ = 200 кПа – давление газовой смеси на входе в турбодетандер; $p_{\text{к}}$ = 110 кПа – давление газовой смеси на выходе из турбодетандера, определяются следующие параметры:

— начальная концентрация диоксида углерода и азота в газовой смеси: $r_{co_2(\text{н})}$ – задается; $r_{N_2(\text{н})} = 1 - r_{co_2(\text{н})}$;

— начальное содержание диоксида углерода (в одном килограмме азота)

$$d_{CO_2(\text{н})} = \frac{\mu_{co_2} \cdot r_{co_2(\text{н})}}{\mu_{N_2} - r_{N_2(\text{н})}}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \quad (2)$$

где μ_{co_2} и μ_{N_2} – молекулярная масса диоксида углерода и азота;

— парциальное давление диоксида углерода в газовой смеси, поступающей в турбодетандер

$$p^{"}_{CO_2(\text{н})} = p_{\text{н}} \cdot r_{co_2(\text{н})}, \text{ кПа}; \quad (3)$$

— для предотвращения образования твердой фазы диоксида углерода до турбодетандера начальная температура газовой смеси $T_{\text{н}}$ принимается на один градус выше температуры насыщения диоксида углерода (недоохлаждение потока) $T_{\text{н}} = T^{"}_{CO_2(\text{н})} + 1$, К;

— температура насыщения диоксида углерода на входе в турбодетандер определяется по таблицам термодинамических свойств диоксида углерода на линии равновесия «кристалл – пар»

$$T^{"}_{CO_2(\text{н})} = f\left[p^{"}_{CO_2(\text{н})}\right], \text{ К}; \quad (4)$$

— показатель изоэнтропы газовой смеси, поступающей в турбадетандер

$$k = \frac{\frac{r_{N_2(\text{н})}}{k_{N_2}-1} + \frac{r_{co_2(\text{н})}}{k_{co_2}-1} + 1}{\frac{r_{N_2(\text{н})}}{k_{N_2}-1} + \frac{r_{co_2(\text{н})}}{k_{co_2}-1}}, \quad (5)$$

где k_{N_2} и k_{co_2} – показатели изоэнтропы азота и диоксида углерода по начальным параметрам газовой смеси;

— конечная температура (условная) газовой смеси при расширении потока без вымораживания диоксида углерода

$$T_{\text{к(усл.)}} = T_{\text{н}}\left[1 - \eta_s(1 - \pi_{\text{д}}^{\frac{1-k}{k}})\right], \text{К}; \quad (6)$$

где $\eta_s = 0{,}8$ – принятое значение изоэнтропного КПД турбодетандера;

— конечная температура газовой смеси и конечное содержание диоксида углерода определяются по диаграмме i-d [7]

$$T_{\text{к}} = f\left[T_{\text{к(усл.)}}, d_{co_2(\text{н})}\right], \text{К}, \quad (7)$$

$$d_{co_2(\text{к})} = f\left[T_{\text{к(усл.)}}, d_{co_2(\text{н})}\right], \text{кг/кг}; \quad (8)$$

— удельное количество вымороженного диоксида углерода

$$\Delta g_{co_2} = \frac{d_{co_2(\text{н})}}{1+d_{co_2(\text{н})}} - \frac{d_{co_2(\text{к})}}{1+d_{co_2(\text{к})}}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}; \quad (9)$$

— давление насыщенных паров диоксида углерода на выходе из турбодетандера определяется по таблицам термодинамических свойств диоксида углерода на линии равновесия «кристалл – пар» $p''_{CO_2(\text{к})} = f(T_{\text{к}})$, кПа;

— конечная концентрация диоксида углерода в газовой смеси

$$r_{co_2(\text{к})} = \frac{p''_{CO_2(\text{к})}}{p_{\text{к}}}; \quad (10)$$

Второй способ определения параметров процесса вымораживания основан на вычислении теплоты, выделяемой при фазовом переходе диоксида углерода в твердое состояние, и её влияния на конечные параметры газовой смеси. Алгоритм расчета следующий:

— после определения начальных параметров газовой смеси и величины $T_{\text{к(усл.)}}$ (как в первом способе) принимается значение температуры $T_{\text{к}}$ в диапазоне от $T_{\text{к(усл.)}}$ до $(T_{\text{н}} - 3)$;

— далее определяются параметры $p''_{CO_2(\text{к})}$ и $r_{co_2(\text{к})}$ (как в первом способе);

— конечная концентрация азота в газовой смеси

$$r_{N_2(\text{к})} = 1 - r_{co_2(\text{к})}; \quad (11)$$

— конечная массовая концентрация диоксида углерода

$$g_{CO_2(\text{к})} = \frac{\mu_{co_2} \cdot r_{co_2(\text{к})}}{\mu_{N_2} \cdot r_{N_2(\text{к})} + \mu_{co_2} \cdot r_{co_2(\text{к})}}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}; \quad (12)$$

— начальная массовая концентрация диоксида углерода

$$g_{co_2(\text{н})} = \frac{d_{co_2(\text{н})}}{1+d_{co_2(\text{н})}}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}; \quad (13)$$

— удельное количество вымороженного диоксида углерода

$$\Delta g_{co_2} = g_{co_2(\text{н})} - g_{co_2(\text{к})}, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}; \quad (14)$$

— удельная теплота фазового перехода определяется по таблицам термодинамических свойств диоксида углерода на линии равновесия «кристалл – пар»

$$H_{co_2} = f(T_{\text{к}}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (15)$$

— теплота фазового перехода, выделяемая при вымораживании диоксида углерода

$$q_{co_2} = \Delta q_{co_2} \cdot H_{co_2}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (16)$$

— газовая постоянная смеси на выходе из турбодетандера

$$R_{\text{к}} = \frac{8{,}314}{\mu_{N_2} \cdot r_{N_2(\text{к})} + \mu_{co_2} \cdot r_{co_2(\text{к})}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (17)$$

— конечная температура газовой смеси

$$T_{\text{к}} = T_{\text{к(усл.)}} + \frac{q_{co_2}(k-1)}{R_{\text{к}} \cdot k}, \text{К}; \quad (18)$$

— полученное значение $T_{\text{к}}$ сравнивается с ранее принятым значением, причем расхождение не должно превышать 0,1 К; если расхождение больше, то следует повторить расчет с другим принятым значением $T_{\text{к}}$.

Параметры процесса вымораживания, определенные по вышеприведенным методикам, сопоставляются с аналогичными результатами, полученными при анализе вымораживания диоксида углерода в проточной части турбодетандера, которые учитывают скорость образования кристаллов диоксида углерода, их размер, массовую концентрацию и последовательный рост этих величин, а также повышение температуры газовой смеси вследствие подвода к ней теплоты фазового перехода [8]. Приводятся и некоторые экспериментальные данные, полученные при испытании турбодетандера газовой холодильной машины [8].

Результаты сравнения численных значений основных параметров процесса вымораживания приведены на прилагаемом рисунке.

Значения конечной температуры показывают хорошую сходимость при всех способах расчета. Значения удельного количества вымороженного диоксида углерода и степени его извлечения, определяемые с помощью диаграммы i-d, заметно отличаются от значений, полученных при других способах расчета, что объясняется неточностью исполнения диаграммы, причем эта разница увеличивается с ростом начальной концентрации диоксида углерода.

Относительно большие значения конечной температуры, полученные экспериментальным путем, объясняются имеющейся при эксперименте большой степенью недоохлаждения потока на входе в турбодетандер. А так как конечная температура газовой смеси, являясь температурой насыщения паров диоксида углерода, отражает величину конечной концентрации этих паров, то более высокая конечная температура способствует уменьшению полученных при эксперименте значений количества вымороженного диоксида углерода и степени его извлечения.

Для инженерных расчетов можно рекомендовать способ с вычислением теплоты фазового перехода, результаты которого хорошо корреспондируются с результатами более точного (но и более трудоемкого) способа, позволяющего определять многочисленные параметры процесса кристаллообразования в проточной части турбодетандера.

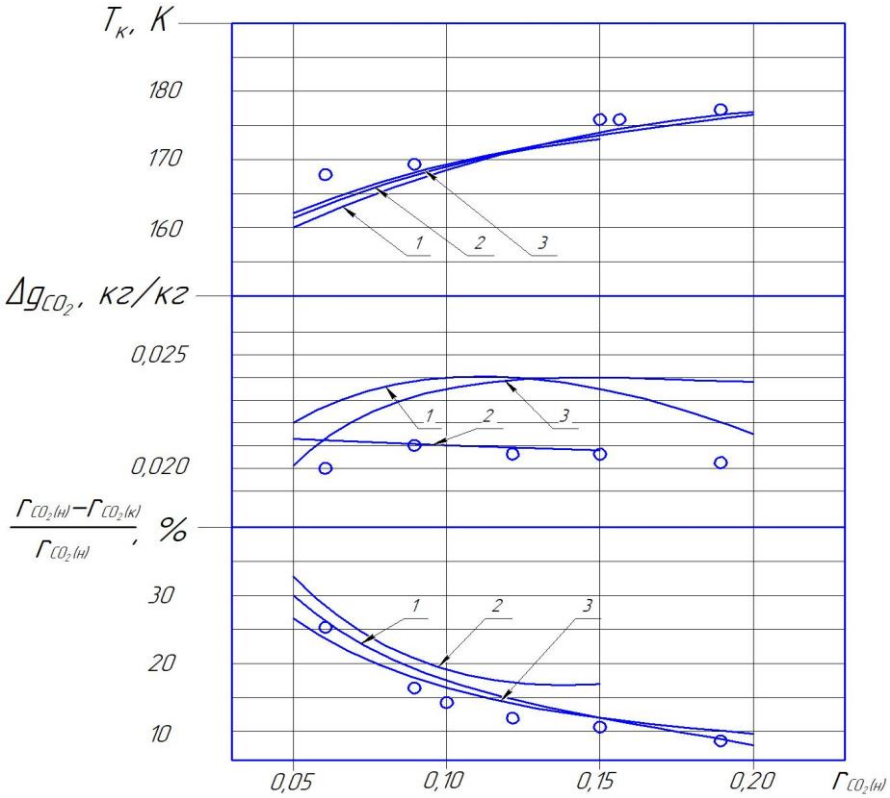


Рисунок. Расчетные зависимости и экспериментальные точки конечной температуры $T_к$, удельного количества вымороженного диоксида углерода Δg_{co_2} и степени извлечения диоксида углерода $\left[r_{co_2(н)} - r_{co_2(к)}\right]/r_{co_2(н)}$, от его начальной концентрации $r_{co_2(н)}$ при различных способах расчета: 1 – способ, учитывающий результаты процесса кристаллообразования в проточной части турбодетандера; 2 – способ с использованием диаграммы i-d; 3 – способ с вычислением теплоты фазового перехода

Литература

1. Немтин В.Г., Усов Д.Ю., Колбасюк К.Ю. Вымораживание диоксида углерода из смеси газов в цикле низкотемпературной газо-холодильной машины // ADVANCED SCIENCE: Сб. статей V Международной науч. – практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение». – 2018. – С. 41–44.
2. Swearingen J.S. Turboexpandas and expansion process for industrial gases // «Cryotech» 73: Production and Use industrial Gases». – Guildford. – 1974. – P.36–42.
3. Swearingen J.S., Shulz B.G. Flushing runs Turboexpander // Oil and Gas Journal. – 1976. – Vol.74. – № 27. – P. 83–89.
4. Honghtor I.D. Mefay. Turboexpander and condensate recovery // Oil and Gas Journal. – 1973. – Vol.71, – № 10. – P. 32–34.
5. Slade E. Carbon dioxide – a versatile cryogenic // Food Processing. – 1982. – № 6. – P. 27–29.
6. Bergmann D., Mafi S. Selection quide for expansion turbines // Hydracarbon Proceding. – 1979. – August. – P. 83–86.

7. Данилов М.М., Савчук А.В. Построение и использование диаграммы i-d для смеси N_2 – CO_2 // Научный журнал НИУ ИТМО.Серия: Холодильная техника и кондиционирование. – 2018. № 1(28). – С. 38–46.
8. Данилов М.М. Особенности процесса получения твердого диоксида углерода в низкотемпературных турбодетандерах: дис. … канд. техн. наук – СПб., 2003 – 142 с.

УДК 665.725

ОЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА СМЕШЕННЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ АГЕНТОМ

В.А. Ермолаев

Российский экономический университет им. Плеханова, Москва, Россия

ermolaevvla@rambler.ru

Аннотация
Представлен состав и свойства компонентов смешанного хладагента. Произведен расчет удельного количества теплоты при ожижении природного газа смешанным холодильным агентом.

Ключевые слова
Ожижение природного газа, смешанный хладагент.

Сжиженный природный газ получают путем сжатия и охлаждения природного газа до температуры -160°С. При этом газ уменьшается в объеме почти в 600 раз, он представляет собой не токсичную жидкость без запаха и цвета, плотность которой в 2 раза меньше плотности воды. Процесс сжижения природного газа многоступенчатый и относительно энергозатратный – расходы на сжижение могут составлять порядка 25% от энергии, содержащейся в конечном продукте. Несмотря на это отрасль сжиженного газа активно развивается во всем мире. [1, 2, 3].

В технологии сжижения природного газа теплоту от него отводят смешанным холодильным агентом (СХА) [4]. Рассчитаем какое количество тепла можно подвести к СХА для его нагрева от – 165°С до 45°С.

Состав СХА, химические формулы, мольные массы и плотности в газовой фазе при н.у. компонентов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав и свойства компонентов смешанного холодильного агента

Компоненты газовой смеси	Химическая формула	Состав, % (моль.)	Мольная масса, кг/кмоль	Плотность газа при н.у.
метан	CH_4	19	16	0,7143
этилен	C_2H_4	28	28	1,2500
пропан	C_3H_8	12	44	1,9643
азот	N_2	12	28	1,2500
н-бутан	C_4H_{10}	29	58	2,5893

Известно избыточное давление СХА в процессе его нагрева равное $p_{изб}$ = 2 атм, тогда абсолютное $p_{абс}$ = 3 атм. Тогда исходя из общего давления и состава СХА можно найти парциальные давления и соответствующие температуры кипения каждого компонента. Метан и азот, участвуя в процессе охлаждения природного газа, не меняют агрегатное состояние, т.е. входят и выходят в виде газа. Остальные компоненты – этилен, пропан и н-бутан из жидкости превращаются в пар (газ).

Находим определяющие температуры для жидкости и пара как среднеарифметические температуры. Например, для метана и азота, находящихся в газообразном состоянии, нужно вычислить только температуру газа как

$$t_{\text{опр}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{к}}}{2} = \frac{-165+45}{2} = -60℃ \quad (1)$$

Удельное количество теплоты рассчитываем в случае нагрева компонентов, находящихся в газообразном состоянии (для метана и азота), по уравнению:

$$q_i = c_{\text{П}i}(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}), \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

В случае нагрева жидких компонентов до кипения, преобразования их в пар (газ) и нагрева в газообразном состоянии до $t_{\text{к}}$ = 45 °С удельная теплота определяется как сумма составляющих:

$$q_i = c_{\text{Ж}i}(t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + r_i + c_{\text{П}i}(t_{\text{к}} - t_{\text{кип}}), \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

Результаты расчета сведем в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета удельной теплоты

Компоненты газовой смеси	Удельные теплоты, кДж/кг			Сумма удельных теплот q_i, кДж/кг
	жидкости	испарения	пара	
метан	-	-	441,6	441,6
этилен	140,5	485,9	200,5	826,9
пропан	199,3	451,5	168,3	819,1
азот	-	-	218,5	218,5
н-бутан	326,8	389,3	82,1	798,2
ИТОГО				3104,3

Таким образом, суммарная удельная теплота, которую воспринимает смешанный хладагент при ожижении природного газа составляет 3104,3 кДж/кг. При этом наибольшая доля удельной теплоты приходится на этилен (826,9 кДж/кг), а наименьшая – на азот (218,5 кДж/кг). Представленные результаты расчета могут быть полезны научным сотрудникам и работникам в сфере криогенной техники и ожижения природного газа.

Литература

1. Дорожкин В.Ю., Терегулов Р.К., Мастобаев Б.Н., Технологические процессы сжижения природного газа на заводах СПГ Ближнего востока // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. - № 3. – С. 28-35.
2. Архаров А.М., Архаров И.А., Александров А.А., Шевич Ю.А., Семенов В.Ю., Красноносова С.Д., Колобова А.Н., Лавров Н.А., К анализу существующих установок ожижения природного газа малой производительности // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2010. – № S1. – С. 236-256.
3. Гаврилов Р.В., Архипов В.Т., Желваков А.Ю., Создание инфраструктуры использования сжиженного природного газа // Технические газы. – 2003. – № 1. – С. 20-27.
4. Лихачева Н.И. Анализ эффективности установки ожижения природного газа на смесевом хладагенте // Молодежный научно-технический вестник. – 2016. – № 3. – С. 10.

УДК 664.86

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ СПИРУЛИНЫ

В.А. Ермолаев

Российский экономический университет им. Плеханова, Москва, Россия

ermolaevvla@rambler.ru

Аннотация
Исследован процесс сублимационной сушки при различной толщине слоя. Проанализировано влияние указанного параметра на показатели эффективности обезвоживания: продолжительность, органолептическую оценку и удельные энергозатраты.

Ключевые слова
Спирулина, сублимационная сушка, толщина.

Спирулина представляет собой уникальный продукт, который был известен человечеству уже много сотен лет. Многочисленные клинические исследования, проводившиеся в ведущих медицинских учреждениях всего мира, доказали неоспоримую биологическую ценность спирулины для человека. Благодаря широкому комплексу веществ данный продукт характеризуется высокой функциональной активностью и проявляет самые разнообразные благоприятные свойства [1]. Спирулина применяется для лечения и профилактики многих заболеваний в качестве функционального продукта [2]. Она используется в хлебобулочном производстве [3], молочных продуктах [4], при производстве различных напитков [5].

Как правило, после сбора спирулина подвергается сушке для дальнейшего измельчения в порошок или производства сухих таблеток. Из всех известных способов обезвоживания сублимационная сушка является одним из наиболее щадящих методов удаления влаги. Сушка осуществляется при остаточном давлении ниже тройной точки воды. При этом удается удалять влагу непосредственно из кристаллической фазы и проводить процесс при низких температурах.

Толщина слоя сушки является одним из существенных факторов сушки. Как правило, при увеличении данного параметра может снижаться качество продукта, однако при этом возрастает производительность установки в целом.

В рамках данной работы производили опыты по сублимационной сушке спирулины при различной толщине слоя. Указанный параметр меняли в пределах от 5 до 25 мм с шагом в 5 мм. В экспериментах остаточное давление составляло 50 Па, а температура поверхности испарителя в десублиматоре - минус 50°С.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, схема которой приведена на рис. 1.

Установка содержит в себе 2 сушильные камеры, в каждой из которых размещается по 4 поддона с продуктом. Камеры с помощью трубопровода сообщаются с полостью десублиматора, где размещен испаритель холодильной машины. С помощью вакуум-насоса создается необходимое давление (порядка 100 Па). Влажный воздух, выходя из сушильных камер, проходит через десублиматор, где происходит вымораживание влаги на поверхности испарителя холодильной машины. Подвод теплоты к продукту осуществляется от инфракрасных ламп, которые размещены вертикально по периферии камер.

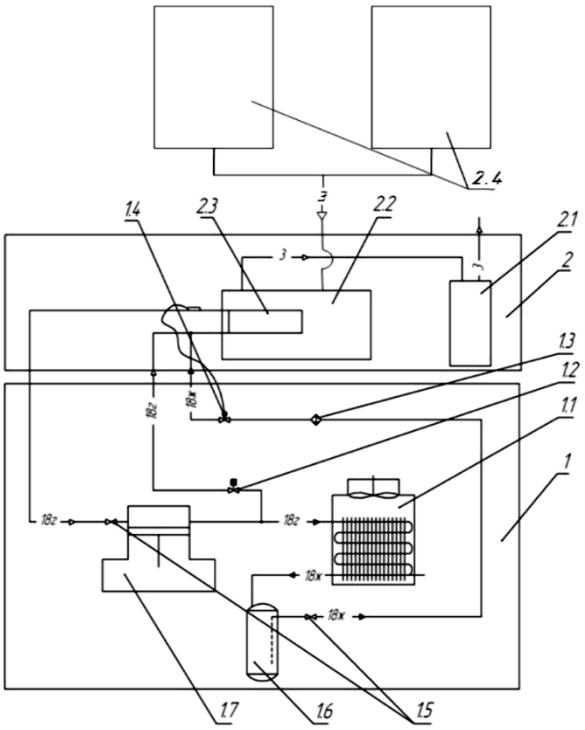


Рис. 1. Схема сублимационной сушильной установки: 1 – блок холодильной машины; 1.1 – конденсатор; 1.2 – регулирующий вентиль; 1.3 – фильтр-осушитель; 1.4 – терморегулирующий вентиль; 1.5 – запорные вентили; 1.6 – ресивер; 1.7 – компрессор; 2 – блок десублиматора; 2.1 – вакуум-насос; 2.2 – десублиматор; 2.3 – испаритель; 2.4 – сушильные камеры

Лиофилизированная спирулина представляла собой обезвоженный рыхлый слой биомассы, который при измельчении давал мелкодисперсный порошок темно-зеленого цвета. Органолептическую оценку проводили по оценке таких показателей как вкус, цвет, консистенция и запах. Первые два показателя оценивали по 15-бальной шкале, вторые два показателя – по 10-бальной шкале.

В таблица приведены показатели эффективности сублимационной сушки спирулины.

Таблица

Показатели эффективности сушки спирулины при подборе толщины слоя продукта

Показатель	Толщина слоя сушки, мм				
	5	10	15	20	25
Продолжительность сушки, ч.	10,5	12	13	14	14,5
Органолептическая оценка, баллы	47 из 50	48 из 50	48 из 50	47 из 50	46 из 50
Удельные энергозатраты, кВт/кг влаги	12,8	7,1	4,8	4,0	3,5

Установлено, что увеличение толщины слоя от 5 до 25 мм приводит к повышению продолжительности сушки от 10,5 до 14,5 ч. Наибольшей органолептической оценкой обладала спирулина, обезвоженная при толщине слоя 10-15 мм. С повышением толщины слоя снижаются удельные энергозатраты, поскольку увеличивается производительность сушильной установки.

Таким образом, на основании проведенного исследования установлено рекомендуемое значение толщины слоя сушки, которое составило 20 мм. Представленные результаты могут быть полезны работникам пищевой промышленности, технологам и научным сотрудникам.

Литература

1. Soni R.A., Sudhakar K., Rana R.S., Spirulina – from growth to nutritional product: a review // Trends in Food Science & Technology. – 2017. - No. 69. – p. 157-171.
2. Нехорошев М.В., Геворгиз Р.Г., Железнова С.Н., Спирулина – перспективный источник противоопухолевых соединений // Российский биотерапевтический журнал. - 2018. – Т. 17. № 5. – С. 51-52.
3. Иванова З.А., Тхазеплова Ф.Х., Влияние спирулины на показатели качества хлебобулочных изделий из ячменной и пшеничной муки // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5. – № 10. – С. 24-26.
4. Болкунов П.С., Мамаев А.В., Родина Н.Д., Сергеева Е.Ю., Научная новизна и практическая значимость применения мороженого с биологически активным комплексом «Спирулина-лён» // Евразийский союз ученых. – 2016. – № 3-3 (24). – С. 124-126.
5. Ivannikova N.V., Gorbatovskaya N.A. The use of spirulina in vegetable juices // Механика и технологии. – 2018. – № 1 (59). – С. 55-59.

УДК621.565.2

К РАСЧЕТУ АККУМУЛЯТОРОВ ХОЛОДА С ВЕЩЕСТВАМИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

В.Ю. Захарова, П.А. Кузнецов, А.В. Бараненко, Р.О. Файзуллин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

viktoriasju@yandex.ru

Аннотация
Представлена усовершенствованная методика (математическая модель) для численных расчетов фазовых переходов твердое тело – жидкость на основе нульмерного решения задачи Стефана для случаев размещения веществ с фазовым переходом в капсулах шарообразной или цилиндрической формы. Численные расчеты объемной доли жидкой фазы по предложенной модели в Scilab имеют хорошее соответствие экспериментальным данным для н-октодекана, при этом время расчетов сокращается в сотни раз в сравнении с расчетами во Fluent.

Ключевые слова
Аккумулятор тепловой энергии, вещества с фазовым переходом, нестационарный теплообмен при фазовых переходах, математическое моделирование, системы кондиционирования воздуха.

Аккумулирование холода целесообразно применять при переменных нагрузках потребителей, при большой разнице тарифов на электроэнергию в дневное и ночное время, при наличии технико-экономических оснований использования для накопления энергии холода возобновляемых энергетических ресурсов (например, энергии солнца и ночного радиационного охлаждения) [1-5]. Переменные мощности хладоснабжения имеют место, например, на производственных холодильниках при поступлении больших объемов продовольствия, требующих охлаждения или замораживания, в системах кондиционирования воздуха, у которых потребление холода в дневные часы, как правило, всегда выше, чем ночью. Снятие пиковых нагрузок аккумулируемым холодом позволяет применять холодильные системы с меньшей мощностью. Накопление холода компрессорными холодильными машинами в ночное время при двойных тарифах сокращает расходы на электроэнергию.

В накопителях холода в качестве аккумулирующей среды могут использоваться жидкости, намораживаемый водный лед, вещества с фазовым переходом (ВФП). Применение ВФП позволяет сокращать объемы емкостей аккумуляторов в 5 – 14 раз в сравнении с использованием жидкостей [3]. Преимуществами применения ВФП также являются постоянная температура фазового перехода, химическая стабильность и экономическая эффективность. В подобных аккумуляторах холода для накопления энергии основную роль играет удельная теплота фазового перехода. При фазовом переходе жидкость – твердое тело происходит зарядка аккумулятора, а использование запасенного холода – при обратном фазовом переходе твердое тело - жидкость [6].

ВФП могут размещаться в емкости накопителей холода в капсулах в виде шаров, а также труб круглого или прямоугольного сечения. При этом хладоноситель циркулирует в пространстве между капсулами [6]. Такой тип аккумуляторов наиболее распространен. Плотность размещения ВФП в аккумуляторе в капсулах шаровой формы составляет порядка 50%, в трубах прямоугольного сечения – порядка 90%

объема [7]. В другом исполнении ВФП располагается в баке аккумулятора, а хладоноситель циркулирует внутри труб теплообменника, размещенного в баке.

Для проектирования аккумуляторов холода с ВФП, помимо других аспектов, необходимо достоверно рассчитывать процессы фазовых переходов жидкость – твердое тело и твердое тело – жидкость, соответствующих зарядке и разрядке накопителей энергии холода.

Изучению аккумуляторов тепловой энергии и протекающих в них процессов при зарядке и разрядке посвящено достаточно большое число работ [8-17]. Основным методом расчета процессов при фазовых переходах является энтальпийно-пористый подход при численном решении системы уравнений Навье-Стокса для ВПФ, рассматриваемого как несжимаемая жидкость [14 – 17]. Граница фазового перехода непосредственно не моделируется, что обеспечивается единством задания уравнений для твердой и жидкой фазы. При этом объемная доля жидкой фазы β полагается зависящей от температуры T следующим образом [14]

$$\beta = \begin{cases} 0, \text{ если } T < T_{sol} \\ 1, \text{ если } T > T_{liq} \\ \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}}, \text{ если } T_{sol} < T < T_{liq} \end{cases}, \quad (1)$$

где T_{sol} – температура солидуса, T_{liq} – температура ликвидуса.

Изменение вязкостных свойств при фазовом переходе учитывают посредством введения в зоне перехода пористой зоны, пористость которой меняется от 0 (твердая фаза) до 1 (жидкая фаза). Константы пористой зоны определяются в ходе численного эксперимента [18].

Идея энтальпийного подхода состоит в замене в уравнении энергии неизвестной температуры на энтальпию H, определяемую через температуры фазового перехода и долю жидкой фазы [15]

$$H = H_{ref} + \beta L + \int_{T_{ref}}^{T} c dT, \quad (2)$$

где H_{ref} – энтальпия при относительной температуре T_{ref}, L – теплота фазового перехода, c – удельная теплоемкость ВПФ. Подобный подход позволяет учитывать теплоту фазового перехода непосредственно в уравнении энергии

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \boldsymbol{v} H) = \nabla(k \nabla H), \quad (3)$$

где $\boldsymbol{v}$ – скорость жидкости, t – время, k – теплопроводность ВПФ, ρ – плотность ВПФ. Теплопроводность и плотность являются функциями температуры.

Однако недостатком данного подхода является как наличие проблем со сходимостью сильно нелинейной задачи при численном решении, так и большое время расчетов даже для двумерных задач.

Альтернативным является подход, связанный с решением задачи Стефана, где неизвестной является расположение подвижной границы фазового перехода. Здесь задаются граничные условия на границе раздела твердой и жидкой фазы. А именно условие непрерывности температур и условие для теплового потока. Решение подобных систем уравнений находится аналитически для одномерных случаев при зарядке аккумулятора, так как не требуется подробно рассматривать конвективные тепловые потоки в жидкой фазе. Классические решения задачи Стефана приведены в

[19–21]. Однако решение в случае разрядки аккумулятора требует учета тепловых потоков в жидкой фазе и процесса естественной конвекции.

Авторами данной статьи предложена методика расчета тепловых потоков при разрядке аккумуляторов на основе нульмерного решения задачи Стефана для случаев размещения ВФП в капсулах шарообразной или цилиндрической формы. Неизвестными тут являются средний радиус положения границы фазового перехода r_m и температура оболочки капсулы T_c, как показано на рис. 1. Полагается, что фазовый переход происходит при постоянной температуре T_m.

Рис. 1. Тепловая модель аккумулятора с ВПФ

Уравнение для границы раздела фаз

$$\frac{dr_{\mathrm{m}}(t)}{dt} = -\frac{T_{\mathrm{c}}(t)-T_{\mathrm{m}}}{R(t)} \frac{1}{\rho_f A_{\mathrm{m}}(t)[L+c_{\mathrm{f}}(T_{\mathrm{c}}(t)-T_{\mathrm{m}})]}, \tag{4}$$

где c_{f} и ρ_f – удельная теплоемкость и плотность жидкой фазы соответственно, A_{m} – площадь границы раздела фаз, вычисляемая через средний радиус $r_{\mathrm{m}}(t)$, R – тепловое сопротивление шаровой или цилиндрической прослойки жидкой фазы, вычисляемое в соответствии с [22]

$$R(t) = \frac{r_{\mathrm{c}}-r_{\mathrm{m}}(t)}{4\pi r_{\mathrm{c}} r_{\mathrm{m}}(t) k_{\mathrm{ef}}}, \tag{5}$$

$$R(t) = \frac{1}{2\pi k_{\mathrm{ef}}} \ln \frac{r_{\mathrm{c}}}{r_{\mathrm{m}}(t)}. \tag{6}$$

где r_{c} – внутренний радиус оболочки. Формула (5) применима в случае шаровой оболочки, (6) – для цилиндрической. Эффективный коэффициент теплопроводности k_{ef} вычисляется по формуле

$$k_{\mathrm{ef}} = \begin{cases} k_{\mathrm{f,}} \ \mathrm{Pr} < 1000 \\ 0{,}18 \cdot k_{\mathrm{f}} \cdot (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr})^{0{,}25}, \end{cases} \tag{7}$$

$$\mathrm{Gr} = b_{\mathrm{m}} \cdot g\left(r_{\mathrm{c}} - r_{\mathrm{m}}(t)\right)^3 \frac{T_{\mathrm{c}}-T_{\mathrm{m}}}{\nu^2}, \tag{8}$$

где ν – кинематическая вязкость жидкой фазы, g – ускорение свободного падения.

Для $T_{\mathrm{c}}(t)$ записывается уравнение в предположении равномерного температурного поля оболочки

$$\mathrm{C}\frac{dT_{\mathrm{c}}(t)}{dt} + \frac{T_{\mathrm{c}}(t)-T_{\mathrm{m}}}{R(t)} + \sigma(T_{\mathrm{c}}(t) - T_a) = 0, \tag{9}$$

где C – полная теплоемкость оболочки, σ – тепловая проводимость от оболочки к теплоносителю с температурой T_a. При больших значениях σ модель превращается в модель для известной температуры $T_c = T_a$.

Уравнения (4) – (9) решаются численно.

Для проверки разработанной методики произведено сравнение расчетных величин с экспериментальными и рассчитанными в пакете Fluent с использованием уравнений (1) – (3) данными в [14] для н-октодекана. В [14] при численном решении используется аппроксимация первого порядка, что приводит к вычислительной погрешности. Использованная авторами настоящей статьи аппроксимация второго порядка при численном решении лучше соответствует экспериментальным данным. Численный расчет по формулам (4) – (9) проведен в пакете Scilab. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

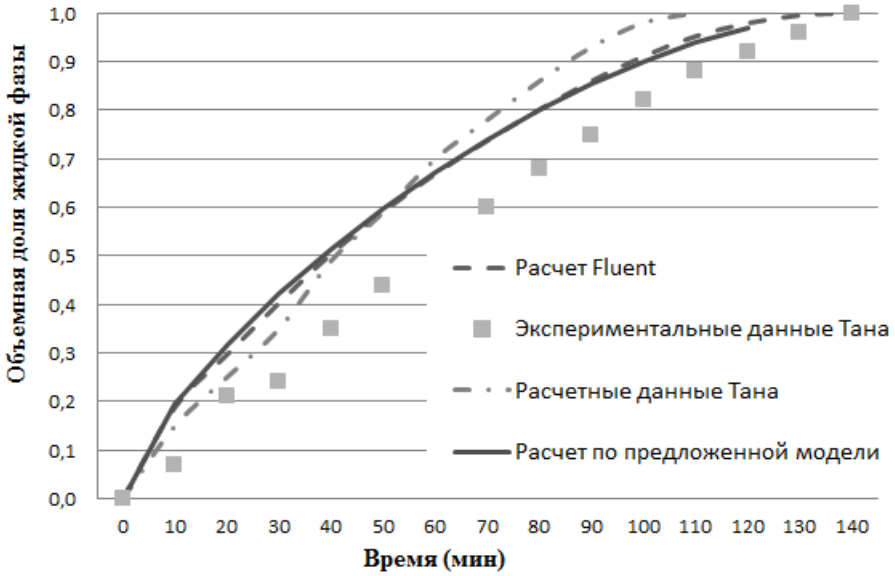


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов и экспериментов

Как видно из рис. 2, расчеты объемной доли жидкой фазы по предложенной модели в пакете Scilab фактически совпадают с численными расчетами в пакете Fluent, однако время расчетов в последнем случае возрастает в сотни раз. Полученные результаты также имеют хорошее соответствие экспериментальным данным, расхождение может быть вызвано введением термоэлектрических преобразователей в капсулы при экспериментах, которое не учитывалось при численных расчетах. Это позволяет использовать разработанную математическую модель в методике расчета и проектирования аккумуляторов холода с ВПФ.

Литература

1. Energy Storage Technology Roadmap. Technical Annex. International Energy Agency. – 19 March 2014. – 31 с.
2. Rabczak S., Free-Cooling in Seasonal Cold Accumulator //IJNTR. – 2015. – Т. 1. – Вып. 8. – С. 49–52.
3. Veerakumar C., Sreekumar A., Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review //Int. J. Refrig. – 2016. – Т. 67. – С. 271–289.

4. Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R., Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications // Int. J. Refrig. – 2017. – T. 76. – C. 271–295.
5. Kim G.T., Choi Y.U.,. Chung Y, Kim M.S., Park K.W., Kim M.S. Experimental study on the performance of multi-split heat pump system with thermal energy storage // Int. J. Refrig. – 2018. – T. 88. – C. 523–537.
6. Li G., Hwang Y., Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application // Int. J. Refrig. – 2012. – T. 35. – №8. – C. 2053–2077.
7. Iten M., Liu S., A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems //Energy Convers. Manag. – 2014. – №77. – C. 608–627.
8. Bosholm F., López-Navarro A., Gamarra M., Corberán J.M., Payá J. Reproducibility of solidification and melting processes in a latent heat thermal storage tank// Int. J. Refrig. – 2016. – T. 62. – C. 85–96.
9. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – T. 13. – C. 318–345.
10. Khan Z., Khan Z.A. An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system // Energy Convers. Manag. – 2017. – T. 154. – C. 157–167.
11. Yaoa C., Konga X., Lic Y., Dud Y., Qia C. Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building //Energy Convers. Manag. – 2018. – T. 155. – C. 20–31.
12. Joybari M.M., Seddegh S., Wang X., Haghighat F. Experimental investigation of multiple tube heat transfer enhancement in a vertical cylindrical latent heat thermal energy storage system //Renewable Energy. – 2019. – T.140. – C. 234–244.
13. Mishra L., Sinha A., Gupta R. Recent Developments in Latent Heat Energy Storage Systems Using Phase Change Materials (PCMs) – A Review //Green Buildings and Sustainable Engineering. Proceedings of GBSE 2018. – 2019. – C. 25–37.
14. Tan F.L., Hosseinizadeh S.F., Khodadadi J.M., Liwu F. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule //Int. J. Heat Mass Transf. – 2009. – T. 52. – C. 3464–3472.
15. Sattari H., Mohebbi A., Afsahi M.M., Azimi Y.A. CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule // Int. J. Refrig. – 2017. – №73. – C. 209–218.
16. Joybari M.M., Haghighat F., Seddegh S., Al-Abidi A.A. Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging // Energy Convers. Manag. – 2017. – №152. – C. 136–156.
17. Gulfam R., Zhu W., Xu L., Cheema I.I., Sheng P., Zhao G., Deng Y.D. Fabrication and numerical analysis of compact thermal management system integrated with composite phase change material and thermal bridge // Energy Convers. Manag. – 2018. – №156. – C. 25–33.
18. Voller V., Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems //Int. J. Heat Mass Transf. – 1987. T. 30. – C. 1709–1719.
19. Самарский А.А., Вабищевич П.Н., Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
20. Carslaw H., Jaeger J., Conduction of Heat in Solids. 2 edition. — USA: Oxford University Press, 1959. – 510 p.
21. Мейрманов А.М., Задача Стефана. – Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1986. – 238 с.
22. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М., Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.

УДК621.56

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В ФАКЕЛЕ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ В ВАКУУМЕ

А.А. Круглов, Р.Р. Тазитдинов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

al-x-kru@yandex.ru; t.r-ITMO@mail.ru

Аннотация
В статье приведены уравнения для оценки дисперсности капель в факеле распыла и площади поверхности распыления. Рассмотрена система тепловых и массовых балансов в процессе кристаллизации капли при давлении ниже тройной точки воды, позволяющая определить время замерзания и изменение массы капель.
Ключевые слова
Бинарный лёд, жидкий лёд, хладоноситель, вакуумно-испарительная установка, ice slurry, факел распыления, диаметр капель.

Применение бинарного льда в пищевой отрасли становится все более распространено, и эта тенденция будет продолжаться. Прежде всего, это вызвано его высокой охлаждающей способностью [1], которая позволяет понизить температуру продукта за короткий временной промежуток, тем самым увеличить срок хранения и повысить качество. Бинарный лёд представляет собой смесь ледяной воды и кристаллов льда. Массовая доля льда до 30%, с размером ледяных частиц менее 0,5 мм, дает возможность его перекачивать с помощью обычных центробежных насосов [2].

Производство бинарного льда путем распыления воды в вакуумно-испарительной установке позволяет контролировать размер и форму ледяных частиц. Это является ключевым элементом при производстве бинарного льда, так как форма и размер кристаллов льда оказывают существенное влияние на его свойства [3]. Также технология получения бинарного льда при давлении ниже тройной точки воды, исключает применение традиционных холодильных машин, работающих на синтетических хладагентах. Это делает установку экологически безопасной, что является приоритетом для холодильной отрасли после внесения Кигалийской поправки в Монреальский протокол [4].

Для расчета кристаллизации капель в факеле больший интерес представляют дисперсные характеристики распыления, а не конструкция форсунок, хотя эти характеристики во многом зависят от конструктивных особенностей форсунок. Струя, выходящая из форсунки, дробится на множество капель, образуя при этом факел распыла. Для определения времени замерзания капель в факеле, необходимо знать их диаметр. Можно выделить два наиболее применяемых средних диаметра капли в факеле распыла: объемно-поверхностный (заутеровский) и медианный. Объемно-поверхностный (заутеровский) диаметр – это диаметр, который имели бы капли одинакового размера, если бы их общая поверхность и объем были такими же, как и в струе, состоящей из капель различных размеров. Медианный диаметр – это диаметр капли, при котором 50% от общего объема (или массы) распыляемой жидкости состоит из капель с диаметрами большими, чем медианный, и 50% – с меньшими.

Для определения распределения капель по диаметрам можно воспользоваться эмпирическим уравнением Розина-Раммлера (1), которое хорошо согласуется с

экспериментальными данными, благодаря чему, получило широкое распространение [5].

$$R_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_i}{a_m}\right)^n\right], \quad (1)$$

где R_i – суммарная доля капель с диаметром, меньшим или равным диаметру d_i; a_m – постоянная размера; n – показатель распределения.

Значения a_m и n зависят от конструкции форсунки, свойств распыляемой жидкости, режима истечения и параметров среды, в которую производится диспергирование. Зная константы в уравнении кривой распределения и два средних диаметра, можно полностью оценить дисперсность распыла.

Если распределение подчиняется уравнению Розина-Раммлера, то объемно-поверхностный (d_{32}) и медианный (d_m) диаметры определяются [6]:

$$d_{32} = \frac{a_m}{\Gamma\left(\frac{n-1}{n}\right)}, \quad (2)$$

где $\Gamma\left(\frac{n-1}{n}\right)$ – гамма-функция.

$$d_m = a_m \sqrt[n]{\ln 2}, \quad (3)$$

Из статистических данных получено эмпирическое уравнение, с помощью которого можно определить максимальный диаметр:

$$d_{max} = a_m \sqrt[n]{5{,}924}, \quad (4)$$

Для расчета тепло-, массообменных процессов и определения мощности вакуумного насоса [7], необходимо знать площадь поверхности капель, которая определяется соотношением [8]:

$$F = f_u V \tau, \quad (5)$$

где f_u – удельная поверхность; V – объемный расход жидкости; τ – время движения капель.

Зная средний заутеровский диаметр капель, поверхность единицы объема распыленной жидкости можно определить простым соотношением:

$$f_u = \frac{6}{d_{32}} \quad (6)$$

Процесс кристаллизации капель воды при давлении ниже тройной точки происходит за счет разности парциальных давлений на поверхности капель и окружающей среды (водяного пара). Кристаллизацию капель можно разделить на три этапа: охлаждение, кристаллизация и переохлаждение. При охлаждении, температура капель понижается за счет испарения части их массы. Таким образом, при изменении температуры капель, их диаметр уменьшается. Это изменение необходимо учитывать для точности расчета. Массоперенос можно выразить через первый закон диффузии Фика и определить изменение массы капель за определенный промежуток времени [9]:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{M_w}{\rho_d} \frac{(2+0{,}6 {Re_d}^{1/2} Sc^{1/3}) D_v}{d_d} \left(\frac{P_{sat}}{RT_d} - X\frac{P_\infty}{RT_\infty}\right), \quad (7)$$

где M_w – молекулярная масса водяного пара, кг/моль; d_d – диаметр капли, м; ρ_d – плотность воды, кг/м^3; P_{sat} и T_d – давление и температура на поверхности капли, Па и К; P_∞ и T_∞ – давление и температура в окружающем объеме, Па и К; X – концентрация паров; Re_d – число Рейнольдса; Sc – число Шмидта; D_v – коэффициент диффузии, м^2/с [10].

$$D_v = \frac{T_\infty^{1,75} 10^{-3} \cdot \sqrt{2/M_w}}{(P_1/P_2)\left[2 \cdot (\sum v_w)^{1/3}\right]}, \tag{8}$$

где P_1, P_2 – давление среды, окружающей каплю, Па; v_w – атомный объем водяного пара.

Уравнение изменения температуры капель с учетом явной теплоты, конвективного теплообмена и скрытой теплоты, можно записать:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{h(T_\infty - T_d) - \rho_d h_{fg}\left(-\frac{M_w (2+0{,}6 {Re_d}^{1/2} Sc^{1/3}) D_v}{\rho_d \quad d_d}\left(\frac{P_{sat}}{RT_d} - X\frac{P_\infty}{RT_\infty}\right)\right)}{\frac{\rho_d c_{p,p} r}{3}}, \tag{9}$$

где h – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К); h_{fg} – теплота фазового перехода, кДж/кг; $c_{p,p}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); r – радиус капли, м;.

Таким образом, задавая начальную и конечную температуры капель, из уравнений 7 и 9 мы можем определить время охлаждения и изменение их диаметра.

Начало процесса кристаллизации капель достаточно сложно определить, так как оно зависит от многих факторов. Поэтому для упрощения расчета, необходимо задать температуру переохлаждения, при которой во всех каплях факела начнется процесс кристаллизации. При достижении температуры переохлаждения, происходит мгновенное образование ледяной корки в каплях за счет накопленного переохлаждения, и температура капель, состоящих из воды и льда выравнивается до температуры тройной точки воды. Этот процесс можно описать уравнением:

$$m_l h_l(T_{tr}) + m_s h_s(T_{tr}) = (m_l + m_s) h_l(T_b), \tag{10}$$

где m_l и m_s – масса жидкой и твердой фазы в капле, кг; $h_l(T_{tr})$ и $h_s(T_{tr})$ – энтальпия жидкости и льда при температуре в тройной точке, кДж/кг; $h_l(T_b)$ – энтальпия жидкости при температуре переохлаждения.

Соответственно, чем ниже температура переохлаждения, тем большая часть капли замерзнет. При промерзании капли внутрь, процесс тепломассообмена будет осуществляется не за счет испарения воды, как это было при охлаждении, а за счет сублимации ледяной корки. Полное промерзание капли можно описать тепловым балансом:

$$h_{fu} \Delta m_s = h'_{fg} \Delta m_{es} - h(T_\infty - T_{tr}) \Delta t, \tag{11}$$

где h_{fu} – теплота плавления льда, кДж/кг; h'_{fg} – теплота сублимации льда, кДж/кг; Δm_{es} – масса сублимированного льда, кг.

$$\Delta m_{es} = k_c A_{ds} M_w \left(\frac{P_{sat}}{RT_{ds}} - X\frac{P_\infty}{RT_\infty}\right) \Delta t, \tag{12}$$

где A_{ds} – площадь поверхности капли, м^2; k_c – коэффициент массопереноса, м/с.

Процесс промерзания капель происходит при постоянной температуре, пока оставшаяся часть жидкости не замерзнет. После того как капля полностью замерзнет, ее температура продолжит понижаться. Уравнение, описывающее тепловой баланс этого процесса:

$$\frac{\rho_s c_{p,s} r}{3}\frac{dT_d}{dt} = h(T_\infty - T_d) - \rho_s h'_{fg}\frac{dr}{dt}, \quad (13)$$

Метод расчета, приведенный в этой работе, позволяет определить время кристаллизации капель в факеле. При получении и анализе функции дисперсности распыла, можно определить время замерзания всего факела или его фракции с определеным диаметром капель. Тепломассовый баланс позволит вычислить требуемую мощность вакуумного насоса для кристаллизации факела распыла, и более точно оценить массу полученного льда.

При дальнейшей доработке эта методика поможет сформировать расчетную модель вакуумно-испарительной установки для получения бинарного льда. Оценить энергоэффективность таких установок в сравнении с традиционными холодильными машинами.

Литература

1. Цветков О.Б. Айс-сларри и однофазные хладоносители [Текст] / Цветков О. Б., Лаптев Ю. А. // Холодильная техника. – 2004. – N 3. – С. 2-4. – ISSN 0023-124X.
2. Paul J. District cooling with binary ice. Design and execution of district cooling systems with a liquid, pumpable ice slurry (“binary ice”), Technical University of Denmark.
3. Kauffeld M., Wang M.J., Goldstein V., Kasza K.E. Ice slurry applications, Int. J. Refrigerant 33 (8) (2010) 1491-1505.
4. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Монреальский протокол – Honoris [Текст] / Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. // Холодильная техника. – 2018. – N 3. – С. 24–28.
5. Ходырев А.И., Ходырев Д.А., Блохина М.Г. Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2017. № 4 (289). С. 101-113.
6. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
7. Круглов А.А., Тазитдинов Р., Описание расчетной модели установки для получения «бинарного льда» методом вакуумно-выпарной кристаллизации // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование – 2016. – № 3(23). – С. 26–35.
8. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия 1984. – 253 с.
9. Yunyun Wu a, Xiaosong Zhang, Xuelai Zhang, Muthoka Munyalo, Modeling and experimental study of vapor phase-diffusion driven sessile drop evaporation, Appl. Therm. Eng. 70 (2014) 560 – 564.
10. Chao Wang, Ruina Xu, Yu Song, Peixue Jiang. Study on water droplet flash evaporation in vacuum spray cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer 112 (2017) p. 279–288.

УДК 621.57

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМИ ПРОЦЕССАМИ АБСОРБЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ СО СВЯЗАННЫМ ПОТОКОМ МАССЫ

О.С. Малинина, А.В. Касьянов, А.В. Бараненко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

holmash_malinina@mail.ru

Аннотация
В данной работе проведена оценка энергетической эффективности термодинамического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатыми процессами абсорбции и генерации со связанным потоком массы. Выполнен анализ влияния температуры греющего и охлаждающего источников на тепловой коэффициент. Определены параметры внешних источников при которых возможно определить энергетическую эффективность термодинамического цикла.
Ключевые слова
Термодинамический цикл, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, связанный поток массы, энергетическая эффективность.

В последние десятилетия возрос интерес к абсорбционным бромистолитиевым холодильным машинам (АБХМ) [1, 2, 3, 4, 5, 6 ,7]. Для их работы могут использоваться возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), что находится в тренде развития мировой энергетики, ориентированной на увеличение доли названных ресурсов в энергобалансе с целью повышения энергоэффективности и снижения углеродоемкости мировой экономики [8]. Наибольшее распространение АБХМ получили в системах охлаждения основных технологий, комфортного и технологического кондиционирования в химической, нефтеперерабатывающей, электронной, пищевой промышленности, в жилищно-коммунальном секторе и социальной сфере. Результаты исследований систем охлаждения и кондиционирования воздуха, с использованием абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин на солнечной энергии и ВЭР представлены в работах [1, 3, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15].

Анализ термодинамических циклов АБХМ рассмотрен в ряде исследований [11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Авторы работы [17] приводят классификацию циклов абсорбционных холодильных машин, в которой выделяют одноступенчатый цикл, циклы, имеющие внешние и внутренние замыкания аппаратов по циркуляции раствора, хладагента, тепло и массообмену. Две последние категории могут включать в себя ряд простых или сложных циклов, взаимосвязанных между собой. В названной работе приведено краткое описание тридцати семи различных абсорбционных циклов. Одноступенчатый цикл имеет наибольшее распространение и поэтому является базовым. Изучение возможностей других циклов, определение их преимуществ удобнее всего вести в сопоставлении с одноступенчатым базовым циклом. Многоступенчатые циклы, включающие в себя циклы с многоступенчатой генерацией раствора и многоступенчатой абсорбцией, расширяют возможности базового цикла. Они позволяют использовать для работы машины как высокотемпературные, так и низкотемпературные греющие источники.

Термодинамические циклы АБХМ, включающие в себя многоступенчатую абсорбцию, а также – единовременно многоступенчатые абсорбцию и генерацию раствора могут быть осуществлены посредством внешне связанных процессов переноса теплоты или массы. Данные циклы осуществляются в области более низких концентраций раствора в сравнении с циклом с двухступенчатой генерацией. Это уменьшает опасность кристаллизации раствора при эксплуатации АБХМ. При прочих равных параметрах для осуществления этих циклов требуется меньшая температура греющего источника в сравнении с базовым циклом. Поэтому в таких циклах возможно эффективное использование в качестве греющей среды низкотемпературных ВЭР и энергии солнца. Названные положительные качества этих циклов свидетельствуют об актуальности их изучения.

В работе [22] выполнен анализ циклов АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и двухступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы с воздушным охлаждением абсорберов и конденсатора, при температуре кипения хладагента 5°С и использовании низкотемпературного солнечного тепла для генерации раствора в генераторах. Исследование в первую очередь было направлено на изучение параметров цикла, при которых отсутствует опасность кристаллизации раствора в машине. Установлено, что такой цикл осуществим при температуре конденсации хладагента не выше 53°С. Температура греющего источника при этом составляет порядка 80°С. Теоретический тепловой коэффициент составил около 0,38.

Авторы настоящей статьи выполнили исследование термодинамического цикла с двухступенчатой абсорбцией и двухступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы. В цикле два контура циркуляции раствора, высокотемпературный $G_1 – A_1$ и низкотемпературный $G_2 – A_2$. Внешне связанный процесс переноса массы $G_2 – A_1$. Пар хладагента, выпариваемый в генераторе низкого давления G_2, абсорбируется в абсорбере высокого давления A_1. Действительный цикл представлен на рис. 1.

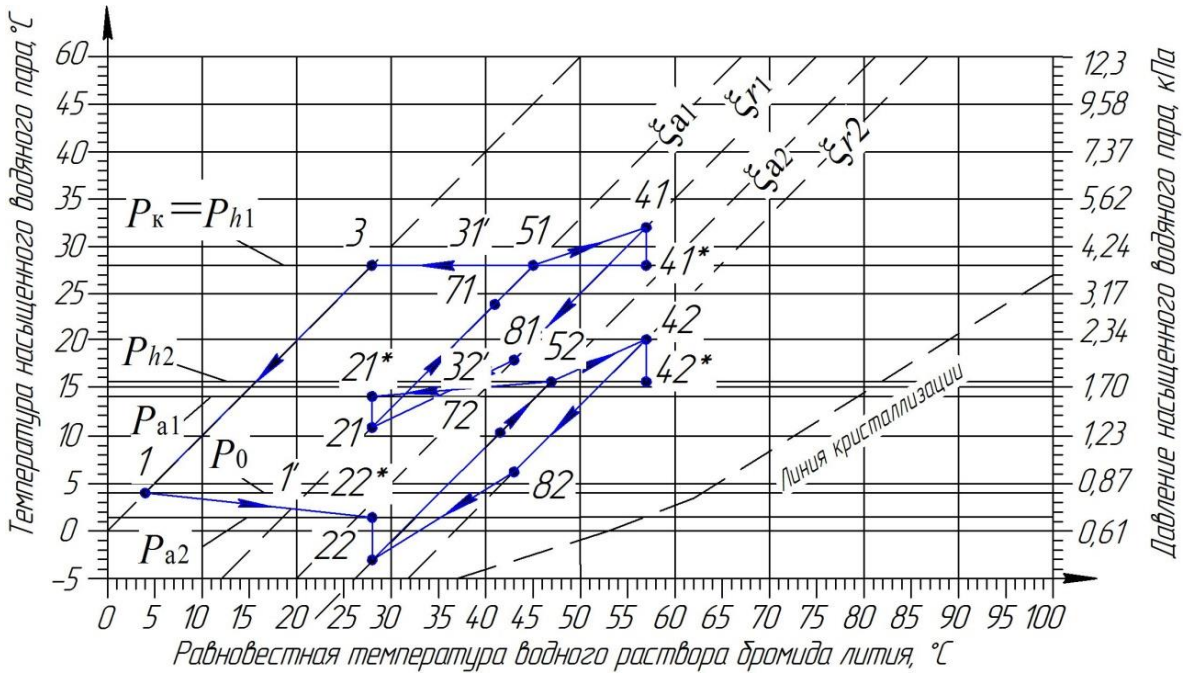


Рис. 1. Термодинамический цикл АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и двухступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы

Основные процессы термодинамического цикла: 1 – 1' – кипение рабочего вещества в испарителе; 22 – **7**2 – нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 72 – 52 – адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 52 – 42 **–** кипение раствора в генераторе второй ступени; 42 – 82 – охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 82 – 22 – адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере второй ступени; 21 – **7**1 – нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 71 – 51 – адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 51 – 41 **–** кипение раствора в генераторе первой ступени; 41 – 81 – охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 81 – 21 – адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере первой ступени; 3' – 3 **–** отвод теплоты перегрева и конденсация пара рабочего вещества в конденсаторе.

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: температура охлаждаемого источника t_{s1} = 12°C, температура охлаждающего источника составила $t_{wк1} = t_{wa11} = t_{wa21}$ = (20; 25; 30; 35; 40)°C, температура греющего источника варьировалась в пределах $t_{h11} = t_{h21}$ = (50 ÷ 80)°C, необратимы потери действительного цикла были приняты согласно рекомендациям, изложенным в известной литературе. Для расчета термодинамических циклов в зависимости от различных параметров внешних источников был разработан программный комплекс, созданный при помощи компилятора gfortran. Программный комплекс состоит из головной программы и ряда подпрограмм. Ввод исходных данных и вывод результатов осуществляется отдельными файлами. Разработанная комплексная математическая модель включает в себя следующие подпрограммы: расчет параметров точек термодинамических циклов; расчет тепловых нагрузок на аппараты; определение теплового коэффициента. Проведен сравнительный анализ одноступенчатой АБХМ и АБХМ с двухступенчатыми процессами абсорбции и генерации.

В табл. 1 представлены результаты расчета АБХМ с двухступенчатыми процессами абсорбции и генерации со связанным потоком массы.

Таблица 1

Результаты расчета АБХМ с двухступенчатыми процессами абсорбции и генерации со связанным потоком массы

		Температура греющего источника $t_{h11} = t_{h21}$, °C					
Параметр	Температура охлаждающей среды $t_{wк1} = t_{wa11} = t_{wa21,}$ °C	55	60	65	70	75	80
Температура охлаждаемой среды t_{s1}, °C	20	–	12	12	12	*	–
	25	–	–	12	12	12	*
	30	–	–	–	–	12	*
	35	–	–	–	–	–	–
Действительная концентрация крепкого раствора второй ступени ξ_{r2}, %	20	–	58,3	61,1	63,4	*	–
	25	–	–	59,6	62,1	64,7	–
	30	–	–	–	–	63,3	–

Продолжение таблицы

		Температура греющего источника $t_{h11} = t_{h21}$, °С					
Параметр	Температура охлаждающей среды $t_{wк1} = t_{wa11} = t_{wa21,}$ °С	55	60	65	70	75	80
	35	–	–	–	–	–	–
Действительная концентрация крепкого раствора первой ступени ξ_{r1}, %	20	–	51,0	53,5	56,0	*	–
	25	–	–	50,6	53,1	55,6	*
	30	–	–	–	–	52,6	*
	35	–	–	–	–	–	–
Зона дегазации второй ступени $\Delta\xi_2$, %	20	–	2,86	5,61	7,91	*	–
	25	–	–	1,21	3,70	6,30	*
	30	–	–	–	–	2,40	*
	35	–	–	–	–	–	–
Зона дегазации первой ступени $\Delta\xi_1$, %	20	–	5,24	7,77	10,31	*	–
	25	–	–	2,51	5,04	7,49	*
	30	–	–	–	–	2,72	*
	35	–	–	–	–	–	–
Тепловой коэффициент ζ	20	–	0,387	0,408	0,414	*	–
	25	–	–	0,321	0,383	0,397	*
	30	–	–	–	–	0,347	*
	35	–	–	–	–	–	–

В табл. 2 представлены результаты расчета цикла одноступенчатой АБХМ.

Таблица 2

Результаты расчета цикла одноступенчатой АБХМ

		Температура греющего источника t_{h1}, °С					
Параметр	Температура охлаждающей среды $t_{wк1} = t_{wa1}$, °С	80	85	90	95	100	105

Продолжение таблицы

		Температура греющего источника t_{h1}, °С					
Температура охлаждаемой среды t_{s1}, °С	20	12	12	*	*	*	*
	25	–	12	12	12	*	*
	30	–	–	–	–	12	*
Действительная концентрация крепкого раствора ξ_r, %	20	61,1	63,4	*	*	*	*
	25	–	60,5	62,7	65,1	*	*
	30	–	–	–	–	64,6	*
Зона дегазации $\Delta\xi$, %	20	5,61	7,94	*	*	*	*
	25	–	2,1	4,27	6,69	*	*
	30	–	–	–	–	3,61	*
Тепловой коэффициент ζ	20	0,773	0,786	*	*	*	*
	25	–	0,652	0,728	0,753	*	*
	30	–	–	–	–	0,694	*

Примечания к табл. 1 и 2: – цикл не осуществим; * – возможна кристаллизация раствора.

На рис. 2 представлен график зависимости теплового коэффициента (ζ) от температуры греющего и охлаждающего источника для цикла АБХМ (рис. 1).

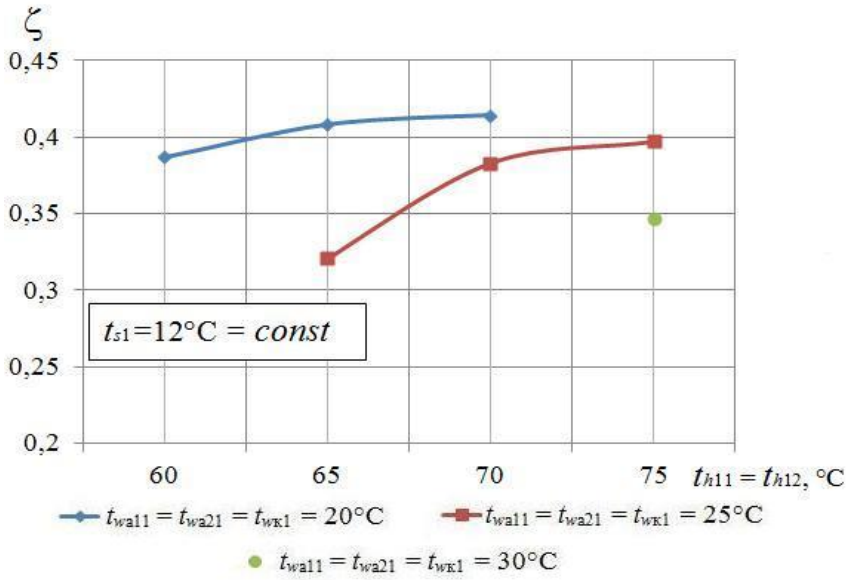


Рис. 2. График зависимости теплового коэффициента от температуры греющего и охлаждающего источника

В результате расчета установлено, что изучаемый цикл при условии недопущения кристаллизации раствора осуществим при температуре греющего источника 60°С ÷ 75°С, температура охлаждающей воды должна быть не более 30°С. При этом действительный тепловой коэффициент цикла находится в пределах 0,35 ÷ 0,41. При тех же значениях температур охлаждаемой и охлаждающей сред ζ одноступенчатого цикла составляет $0{,}69 \div 0{,}79$, однако для его осуществления требуется греющий источник с температурой на 20 ÷ 25°С выше чем для исследуемого цикла.

Литература

1. Palacios E., Izquierdo M., Marcos J.D., Lizarte R. Evaluation of mass absorption in LiBr flat-fan sheets // Appl. Energy. – 2009. – № 86. – С. 2574–2582.
2. Bujedo L.A., Rodriguez J., Martinez P.J., Experimental results of different control strategies in a solar air- conditioning system at part load // Solar Energy. – 2011. – № 85. – С. 1302–1315.
3. Lizarte R., Izquierdo M., Marcos J.D., Palacios E. An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr-H2O absorption chiller prototype for residential use // Energy Build. – 2012. – № 47, – С. 1–11.
4. Ketfi O., Merzouk M., Merzouk N.K., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water–LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones// International Journal of Refrigeration. – 2017. – № 82. – С. 36–50.
5. Chena J.F., Daia Y.J., Wangb H.B., Wanga R.Z. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H2O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application // Solar Energy. – 2018. – № 159. – С. 579-587.
6. Sabbagh A.A., Gómez J.M., Optimal control of single stage LiBr/water absorption chiller // International Journal of Refrigeration. – 2018. – № 92. – С. 1–9.
7. Shiue A., Hu S., Chiang K. Effect of operating variables on performance of an absorption chiller driven by heat from municipal solid waste incineration // Sustain. Energy Technol. Assess. – 2018. – № 27. – С. 134–140.
8. Global Energy & CO2 Status Report 2018 // International Energy Agency. – 2018.
9. Al-Ugla A.A., El-Shaarawi M.A.I., Said S.A.M. Alternative designs for a 24-hours operating solarpowered LiBr-water absorption air-conditioning technology // International Journal of Refrigeration. – 2015. – № 53, – С. 90–100.
10. Li M., Xu C., Hassanien R.H.E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide–water absorption cooling system // International Journal of Refrigeration. – 2016. – № 71, С. 46–59.
11. Lubisa A., Jeonga J., Giannettia N., Yamaguchia S., Saitoa K., Yabasea H., Alhamid M.I., Nasruddin N. Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller // Applied Energy. – 2018. – № 219. – С. 299–311.
12. Sarabia Escriva E.J., Lamas Sivila E.V., Soto Frances V.M. Air conditioning production by a single effect absorption cooling machine directly coupled to a solar collector field. Application to Spanish climates. // Solar Energy. – 2011.– № 85. – 2108–2121.
13. Xu Z.Y., Wang R.Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers // Solar Energy. – 2017. – 158 – С. 511–519.
14. Martínez P.J., Martínez J.C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain // International Journal of Refrigeration. – 2016. – № 71. – С. 85–93.

15. Muye J., Ayou D.S., Saravanan R., Coronas A., Performance study of a solar absorption power-cooling system // Applied Thermal Engineering. – 2016. – № 97. – С. 59–67.
16. Chahartaghi M., Golmohammadi H., Shojaei A.F., Performance analysis and optimization of new double effect lithium bromide–water absorption chiller with series and parallel flows // International Journal of Refrigeration. – 2019. – № 97. – С. 73–87.
17. Xu Z.Y., Wang R.Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the cycle construction // International Journal of Refrigeration. – 2016, – № 62. – С. 114–136.
18. She X., Yin Y., Xu M., Zhang X. A novel low-grade heat-driven absorption refrigeration system with LiCl-H2O and LiBr-H2O working pairs // International Journal of Refrigeration. – 2015. – № 58, – 219–234.
19. Степанов К.И., Мухин Д.Г., Волкова О.В., Бараненко А.В., Анализ COP термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения // Вестник Международной академии холода. – 2016. – № 1. – С. 86–92.
20. Aprile M., Toppi T., Garone S., Motta M., STACY–A mathematical modelling framework for steady-state simulation of absorption cycles // International Journal of Refrigeration. – 2018. – № 88. – С. 129–140.
21. Bowie D., Cruickshank C.A. Experimental evaluation of a triple-state sorption chiller // International Journal of Refrigeration. – 2017. – № 81. – С. 12–25.
22. Izquierdoa M., Venegas M., Rodriguez P., Lecuona A., Crystallization as a limit to develop solar air-cooled LiBr–H2O absorption systems using low-grade heat // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2004. – № 81. – С. 205–216.

УДК 621.56

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ФАЗ И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A В МИНИКАНАЛЕ

А.А. Малышев, К.Ф. Куадио, О.С. Малинина, А.В. Зайцев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

malyshev46@list.ru

Аннотация
Данная работа посвящена развитию методологии расчета гидродинамических характеристик жидкостей, кипящих в миниканалах. В отличии от известных методик, предлагаемая методология основана на использовании истинного объемного полсодержания и прогнозировании режимов течения двухфазных потоков в области устойчивого течения. В работе представлены экспериментальные данные по истинному объемному паросодержанию и потери давления.
Ключевые слова
Миниканалы, двухфазные потоки, истинное объемное паросодержание, потери давления.

Важнейшим направлением энергосбережения в тепло-хладэнергетических системах является использование теплообменных аппаратов (испарителей, конденсаторов) высокой эффективности. Установлено, что повышение коэффициентов теплопередачи этих аппаратов в 2 раза приводит к повышению коэффициентов трансформации установок до 40%. Одним из направлений повышения энергоэффективности холодильных машин и тепловых насосов является применение миниканальных теплообменников.

В работе [1] отмечается, что в связи с высокой эффективностью миниканалов эти технологии уже используются в специальных энергетических установках, в водородной энергетике, химических технологиях и при охлаждении компьютерных систем. Известен опыт применения теплообменников с миниканалами в автомобильных кондиционерах.

Коэффициент теплоотдачи в миниканалах в 2 ÷ 3 раза [2] превышает коэффициент теплоотдачи в щелевых каналах пластинчатых испарителей, при их использовании в 3 ÷ 4 раза снижается уровень заправки хладагентом, снижается масса и повышается прочность.

Миниканальные теплообменники с фазовыми переходами признаны наиболее перспективными для тепло-хладо-энергетического аппаратостроения. [3], [4].

В последние годы появилось немало работ, посвященных анализу тепло-гидродинамических характеристик жидкостей, кипящих в миниканалах. В частности, в [2] приведены результаты экспериментов по теплообмену и гидродинамики при кипении R134a в миниканале с эквивалентным диаметром 0,568 мм при положительных температурах. Результаты получены для диапазона массового паросодержания: $x \geq 0{,}5$. В этой же работе получены данные по устойчивости потоков и наличию реверса, возникающего при определенных скоростях.

К числу же наиболее полных исследований по использованию щелевых технологий следует отнести монографию П. Хрньяк [5], а также работы А. В. Бараненко и Д. Ховалыг [6], [7]. Авторами [3], [4], [8], [9] получен весьма интересный

экспериментальный материал по изучению тепло-гидрадинамических процессов при течении различных сред в миниканалах D_h = 0,25 ÷ 0,5 мм.

Между тем, несмотря на очевидный интерес, проявленный прикладной и фундаментальной наукой, а также производством к миниканальным технологиям, анализ [10] приводит к противоречивым результатам.

Авторам доклада представляется, что разработка такой модели может быть основана на комплексном подходе [10], [11], [12], включающем исследование скольжения фаз и расчет истинных параметров двухфазных потоков, методологию прогнозирования режимов течения, методологию расчета локальной теплоотдачи на основе истинных параметров.

В работе [10] показано, что значение истинного объемного паросодержания (скольжение фаз) является основой комплексного метода, обеспечивающего наиболее корректное моделирование тепло-гидродинамических процессов в широком диапазоне режимных, геометрических и физических параметров.

При исследовании адиабатных течений в каналах малого сечения [13] было отмечено, что скольжением фаз можно пренебречь скольжением, приняв равенство расходного и истинного объемных паросодержаний. Таким образом, априори использовалась гомогенная модель течения правомерная в основном при малых значениях массового паросодержания *x* и пузырьковом режиме течения. При наиболее распространённом в миниканалах кольцевом режиме, такой, в достаточной степени упрощенный подход, может привести к серьезным неточностям.

Анализ литературных источников, посвящённых изучению скольжения фаз [14], показывает, что большинство результатов исследований относятся к специфическим условиям специальной техники. Для условий холодильной техники этот вопрос остается открытым.

Данная работа посвящена анализу гидродинамических процессов кипения в миниканалах с учетом специфики техники низких температур. Исследования поводились на экспериментальном стенде, представленном в [15].

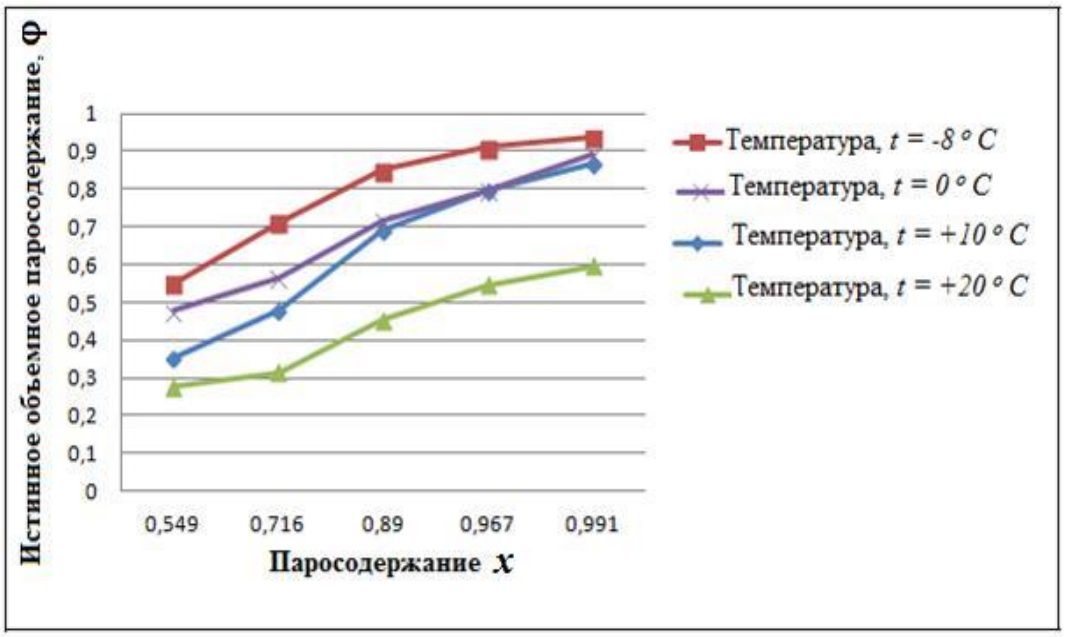


Рис. 1. Зависимость истинное объемное паросодержание φ
от массового паросодержания *x* при кипении хладагента R134a
в миниканале с $D_э$ = 0,5 мм и при G = 450,12 кг/(с·м^2)

Опыты проводились на хладагенте R134a при следующих условиях [12]:

- ✓ адиабатный поток;
- ✓ температура кипения t0 = -10 ÷ +20°C;
- ✓ массовая скорость wρ 100 ÷ 500 кг/(с·м2);
- ✓ массовое расходное паросодержание x = 0,1 ÷ 0,9.

процессе экспериментов объемным методом измерялся расход жидкости, скорость потока на входе в экспериментальный участок, количество сконденсировавшегося пара (пар образовывался в парогенераторе и поступал в экспериментальной блок), мощность нагревателя в парогенераторе, перепады давления при прохождении двухфазного потока через экспериментальный блок, истинное объемное паросодержание (методом отсечки потока).

Результаты исследования истинного объемного паросодержания представлены на рис. 1.

Представленные данные получены при массовой скорости G= 450,12 кг/(с·м^2), что согласно [2] соответствует области устойчивого течения.

Как видно из рис. 1, с понижением температуры существенно возрастает истинное объемное паросодержание и соответственно коэффициент скольжения S.

Это в первую очередь связано с увеличением удельного объема пара при понижении температуры. Так при падении температуры кипения от 0°C до -8°C удельный объем пара увеличивается от 0,069 м^3/кг до 0,092 м^3/кг, (в 1,3 раза). При этом φ возрастает в среднем на 33% в зависимости от величины массового паросодержания x. Важно, что для этого диапазона температур характерен кольцевой режим течения и рост истинного паросодержания в основном обусловлен возрастанием объемов пара при понижении температур.

В диапазоне от 0°C до +20°C величина φ резко снижается. Это объясняется тем обстоятельством, что при положительных температурах снижаются не только объемы пара и соответственно истинные скорости пара, но и режим из кольцевого переходит в снарядный, при котором качественно меняется гидродинамический механизм и уменьшается скольжение.

На рис. 2 представлены значения перепадов давлений на экспериментальном участке.

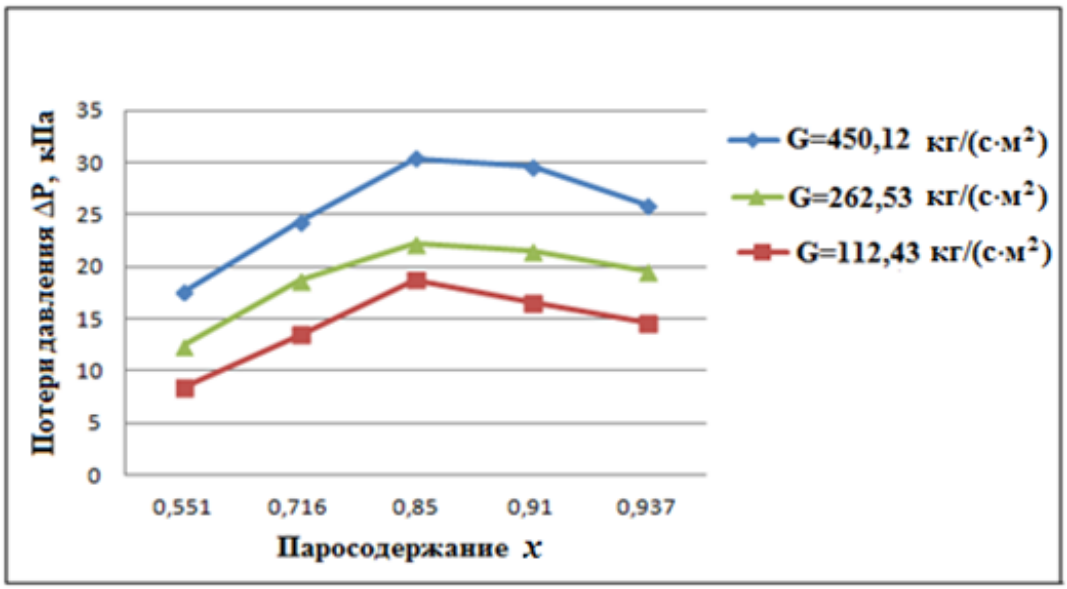


Рис. 2. Зависимость потери давления от паросодержания при кипении хладагента R134a в миниканале с Dэ = 0,5мм и при t = - 8°C

Увеличение перепада давления с ростом скорости вполне понятно. Важно отметить, что при всех значениях массовой скорости при x = 0,85 наблюдается экстремум функции ΔP с последующим снижением перепадов давления.

Как свидетельствуют наблюдения за режимами течения, при этих значениях массового расходного паросодержания наблюдается переход от кольцевого режима течения к эмульсионному. Для эмульсионного течения характерен унос пленки жидкости с поверхности канала в центр потока. Отсутствие жидкой пленки на стенке приводит к снижению сил трения в пограничном слое, что обуславливает некоторое уменьшение потерь давления.

В целом же переход к эмульсионному течению (режим сухой стенки) носит кризисный характер, поскольку сопровождается резким снижением теплоотдачи на этих участках канала.

Следует отметить, что режим сухой стенки наиболее характерен для кипения в миниканалах, поскольку в них (в отличии от труб) на значительной части теплопередающей поверхности процессы парообразования происходят при высоких значениях массового паросодержания (x > 0,5). Следовательно, одной из задач является разработка методики прогнозирования кризисного режима сухой стенки.

Заключение

Полученные результаты исследования процессов гидродинамики при кипении хладагента R134a в миниканале являются развитием комплексного метода анализа тепло-гидродинамических характеристик двухфазных потоков применительно к разработке обобщенной модели кипения жидкостей в стесненном пространстве:

– в работе получены новые экспериментальные данные по скольжению фаз;

– в первом приближении установлены границы режима «сухой стенки», как кризисная область кипения в миниканалах.

Литература

1. Шамирзаев А.С. Режимы течения и теплообмен при кипении движущихся хладонов в миниканалах: автореф. дисс. на к.ф-м.н. – Новосибирск, 2007.
2. Ховалыг Д. М-О. Закономерности динамики двухфазных потоков и теплообмена при кипении хладагента R134a в микроканалах: автореф. дисс. к.т.н. – Санкт-Петербург, 2013.
3. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. 14 Int. Heat Transfer Conf. Washington: ASME. – 2010. – Keynote 22570.
4. Козулин И.А., Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С. Режимы течения и теплоотдачи при кипении в микроканалах различной ориентации // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2011. – №2. – Том 5. – С. 132–137.
5. Niño V.G., Hrnjak P.S. and Newell T.A. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October 2002.
6. Синицына К.М., Зайцев А.В., Бараненко А.В., Аналитическая модель конденсации в миниканалах // Вестник Международной академии холода. – 2016. – № 1. – С. 66–72.
7. Khovalyg D.M., Baranenko A.V., Two-phase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels // Technical Physics. – 2015. – Vol. 85. – № 3. – С. 34–41.
8. М.В. Шустов, Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц: автореф. дисс. …к.т.н. – М., 2015.

9. Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С., Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладона R318C в кольцевом миниканале // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Том 14. – №1. – С. 57–66.
10. Малышев А.А., Киссер К.В., Филатов А.С. Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах // Вестник Международной академии холода. – 2016. – № 2. – С. 67–70.
11. Малышев А.А. Локальные тепло-гидродинамические характеристики двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах: автореф. дисс. …к.т.н. – Ленинград, 1982 г.
12. Малышев А.А., Киссер К.В. Разработка карты режимов кипения R134a, R12, R22, NH3, водо-воздушных смесей и воды в каналах диаметром 6 мм // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2015. – № 4. – С. 46–51.
13. Ullmann A., Brauner N., The prediction of flow pattern maps in minichannels. // Multiphase Science and Technology. – 2007. – Vol. 19 (1). – С. 49–73.
14. Малышев А.А., Киссер К.В., Зайцев А.В., Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах // Вестник Международной академии холода. – 2017. – № 2. – С.53–56.
15. Малышев А.А., Киссер К.В., Куадио К.Ф. Комплексные экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов кипящих хладагентов в мини-(микро) каналах // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Холодильная техника и кондиционирование. – 2017. – №2. – С. 12–17.

УДК 624.139.64

ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОР МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В.В. Ананьев

Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (ПКУ), Москва, Россия

vvanord@yandex.ru

Аннотация
Представлено решение с конденсатором, вмещенном в слой сезонного замораживания и оттаивания, оснований фундаментов объектов строительства Крайнего Севера. Для заправки охлаждающих устройств рекомендованы озонобезопасные хладоны.
Ключевые слова
Мерзлые грунты, охлаждение, термостабилизатор,термостабилизация грунтов.

При строительстве объектов газоконденсатных и нефтяных месторождений в районах Крайнего Севера в настоящее время применяют для сохранения мерзлого состояния и обеспечения несущей способности грунтов оснований по принципу 1 сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ) и рекомендуется [1, 2], как правило, в сочетании с другими охлаждающими устройствами.

В зимнее время температура в верхних слоях грунта лежит в пределах от – 10^0С до – 15^0С и ниже [1, 2, 3] и возникает возможность разработки СОУ с конденсатором, расположенным в массиве грунта ниже дневной поверхности. В пользу такого решения следующие соображения:

1. При температуре воздуха – 20˚С на глубине 1,0 – 2,0 м. средняя температура грунта около – 10^0С, что позволяет расположить конденсатор с производительностью близкой к производительности обычного надземного конденсатора. В конденсаторе поток пленки образуется на цилиндрической поверхности большого диаметра, а затем поступает в трубу испарителя с малым диаметром. При этом толщина пленки и скорость её движения увеличиваются, и повышается интенсивность теплообмена с внешним грунтом [3] (глава 7, пп. 7.3 и 7.4);

2. СОУ с заглубленным конденсатором, то есть полностью вмещенное в грунт замораживающее устройство, позволяет решать задачи термостабилизации мерзлых грунтов преимущественно на больших площадях, где затруднительно эксплуатировать надземные трубы с конденсаторами. Например, аэродромы, вертодромы, взлётно-посадочные полосы, автодороги, верхнее строение и насыпи железных дорог и т. п.

Применение заглубленных термостабилизаторов, передающих тепловую энергию из грунта в приповерхностные слои грунта сезонного замораживания-оттаивания, например, к полотну дороги [4] – весьма эффективный способ борьбы с наледью. Снижается влияние низких температур на полотно дороги, что значительно снизит разрушение асфальта и бетона. В результате снижаются затраты на ремонт дорог и повышается безопасность движения транспорта, что очень актуально для России. Рекомендуется устраивать такие системы на опасных участках дороги (повороты, спуски и подъемы). При конденсации выделяется тепло, которое используется для стабилизации верхней части полотна. Для большего эффекта возможно применение слоя теплоизоляции между испарителем и конденсатором теплового насоса. После монтажа производится засыпка конденсаторов и возведение сооружения. Эта система, как правило, не предназначена для плавления льда и снега,

однако ее мощности хватит для возникновения сублимации, которая ослабит связь между поверхностью сооружения и льдом;

Конструкция трубчатого термостабилизатора мерзлого грунта. (рис. 1) состоит из двух труб: испарителя с диаметром 0,05 – 0,06 м и конденсатором с диаметром 0,2 -0,4 м. Установка трубчатого термостабилизатора производится проходкой скважины под тонкую трубу с последующим проходкой верхней части под трубу с диаметров 0,2 – 0,4 м. Аппарат передает холод от верхних слоев к нижним, как описано в [3], глава 7, п. 7.3 и 7.4, стр. 122 - 130. При этом длина трубы испарителя выбирается таким образом, чтобы глубина накопления холода была невелика и происходила термостабилизация верхних слоев, а потери в глубину и в окружающее пространство были минимальны и чтобы замороженный слой термостабилизировал мерзлый грунт на весь теплый период года.

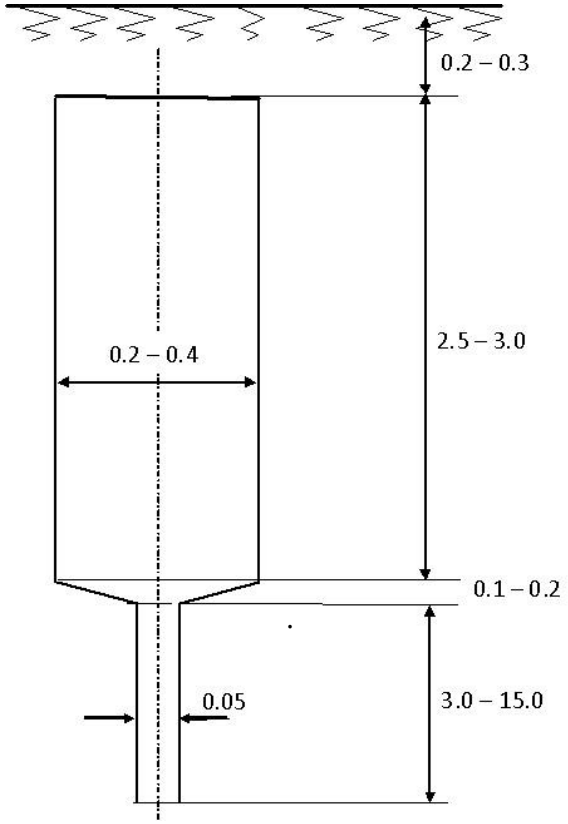


Рис. 1. Заглубленный сезонный термостабилизатор грунта

Для отработки методики предложена установка с размещением на экспериментальном полигоне [5] и состоящая из камеры, моделирующей верхний слой грунта, и конденсатор (рис. 2), и трубы испарителя в грунте. Камера заполнена песком, который охлаждается до температуры - 10°С, например, рассольным способом с помощью холодильной машины. Предусмотрена заправка хладагентами-теплохладоносителями R404A, R410A и R744. Схема измерений предусматривает измерение величин давления и температуры в конденсаторе и в испарителе, температуры песка в камере на границе с трубой СОУ и температуры в окружающем грунте на разной глубине в контрольных термометрических скважинах.

Предложено конструктивное решение сезонного охлаждающего устройства с заглубленным конденсатором в слой сезонного замораживания и оттаивания грунта с целью решения задач проектирования термостабилизации мерзлых грунтов преимущественно на больших площадях, где затруднительно расположить надземные

трубы с конденсаторами, т.е. аэродромы, вертодромы, взлётно-посадочные полосы, автодороги, верхнее строение и насыпи железных дорог и т. п.

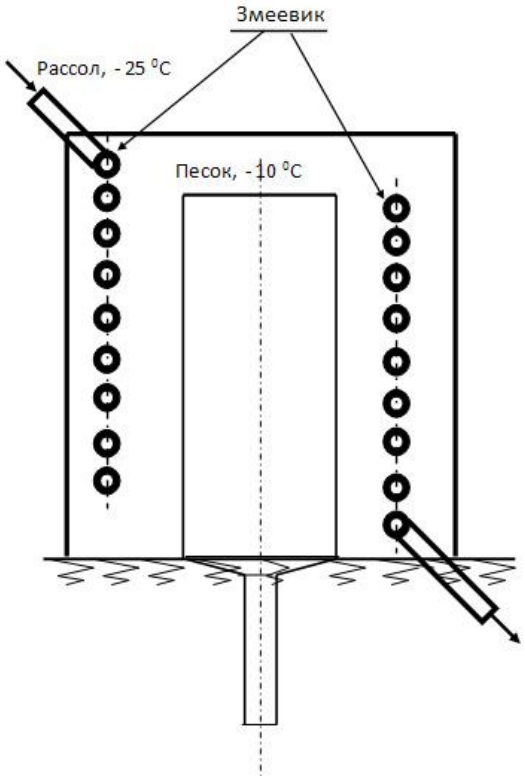


Рис. 2. Схема опытной установки термостабилизатора мерзлого грунта грунта

Дано схемное решение опытной экспериментальной установки отработки методик расчета, испытаний и проверки теоретических положений метода элементарных объемов.

Выбраны озонобезопасные хладоны для заправки сезонных охлаждающих устройств с заглубленным конденсатором.

Литература

1. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах – Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1980. 56с.
2. Теплофизические свойства горных пород – М.: МГУ.1984. 485с.
3. Улитин В.В. Метод элементарных объемов при решении нелинейных задач теплопроводности и геокриологии: монография. – СПб.: Изд-во Парк Ком, 2013. – 170 с.
4. Гамзаев Р.Г. Термостабилизация грунта в дорожном строительстве//Дороги. Инновации в строительстве.2018. – 70.- С.91-93.
5. Тюрин А.И., Исаев В.С.,Сергеев Д.О. и др. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований//Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, изд. Московского унниверситета (М), 2019. – №1. – С.72 -83.

УДК 621.514

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВ ХОЛОДИЛЬНОГО ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА

А.Н. Носков, М. Шапошникова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

dn.noskoff@rambler.ru

Аннотация

Применение в винтовых компрессорах подшипников качения вместо подшипников скольжения позволяет упростить конструкцию винтового компрессора, назначить меньшие профильные зазоры между винтами и уменьшить балластные утечки. Это позволяет повысить КПД компрессора. Применение подшипников качения ограничено ресурсом его работы, который зависит от величин реакций на опорах. Были получены результаты по расчету геометрических характеристик профилей винтового компрессора, обеспечивающих минимальные реакции па опорах, что позволило увеличить ресурс работы подшипников.

Ключевые слова

Холодильный винтовой компрессор, реакции на опорах компрессора, геометрические характеристики профилей винтов, минимальные реакции на опорах компрессора, ресурс работы подшипников.

В полости винтового компрессора в процессе всасывания из полостей с высоким давлением и из подшипников и разгрузочных устройств поступает масло, из которого при понижении давления выделяется газообразный холодильный агент - балластные утечки, которые уменьшают объемные и энергетические показатели работы компрессора.

Применение в винтовых компрессорах подшипников качения вместо подшипников скольжения позволяет упростить конструкцию винтового компрессора, назначить меньшие профильные зазоры между винтами и уменьшить балластные утечки. Для возможности применения подшипников качения необходимо уменьшить реакции на опорах компрессора, которые зависят и от геометрии профилей винтов. Авторами предлагается способ выбора длины профильной части и хода винтов, при которых ресурс работы опорных подшипников будет максимальный.

В качестве решения данной проблемы авторами предлагается способ выбора длины профильной части и хода винтов, при которых реакции на опорах компрессора будут минимальны.

Внутренние протечки зависят от длин линий контактов между винтами.

В работе [1] предлагается проводить сравнение теоретических профилей винтов по относительной длине линии контакта винтов $\sum l_i$, то есть длине линии, приходящейся на единицу объемной производительности. Расчеты проводились при различных относительных длинах винтов $K_l = l_в/D_1$, при этом величина относительного хода ведущего винта $K_H = H_1/D_1$ обеспечивала уменьшение полезного объема парной полости не более чем на 6%. Здесь $l_в$ длина винтов, D_1 внешний диаметр ведущего винта, H_1 ход ведущего винта.

Геометрические характеристики профиля винтов зависят также от кривых, описывающих профиль винтов, соотношения чисел зубьев ведущего и ведомого винтов z_1,z_2, относительной высоты зуба ведущего винта $\zeta = (D_1 - d_{1н})/d_{1н}$, относительной

ширины зуба ведомого винта $\overline{2\gamma_{2з}} = \frac{2\gamma_{2з} \cdot z_2}{2 \cdot \pi}$, относительной длины винтов $K_l = l_в/D_1$ [1]. Здесь: $d_{1н}$ начальный диаметр ведущего винта; $2\gamma_{23}$ величина центрального угла пера зуба ведомого винта, соответственно.

На рис. 1 показан профиль винтов с соотношением числа зубьев z_1/z_2 = 4/6, имеющий основные геометрические характеристики, обеспечивающие высокий КПД холодильного винтового компрессора.

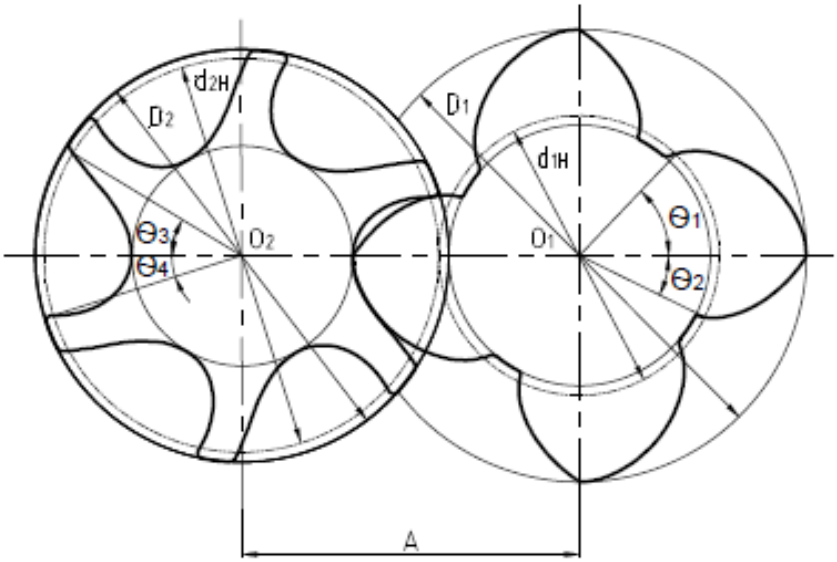


Рис. 1. Торцевые сечения винтов:

Θ_1=48,15^O; Θ_2=26,19^O; Θ_3=32,10^O; Θ_4=17,46^O; $2\gamma_{2з}$ = 10,44^O

Основные геометрические характеристики винтов: диаметр внешней и начальной окружности ведущего винта D_1=135 мм, $d_{1н}$ =80 мм; диаметр внешней и начальной окружности ведомого винта D_2 =125 мм, $d_{2н}$ = 120 мм; ход ведущего винта H_1 =216 мм; длина виттов $l_в$ = 190 мм; угол закрутки ведущего винта $\tau_{1з}$ = 316,7^0; межцентровое расстояние A = 100 мм; теоретическая объемная производительность V_T = 0,0782 м^3/с при частоте вращения ведущего винта n_1 = 49 с$^{-1}$. Величины центральных углов профиля приведены на рис. 1.

В работе [1] показано, что относительные длины винтов K_l, при которых величина $\sum l_i$ имеет минимальное значение, равны 1,4...1,6 для винтов с соотношением числа зубьев на ведущем и ведомом винтах 4/6.

Наличие зазоров между винтами нарушает герметичность и приводит к внутреннему массобмену между сопряженными парными полостями.

Таким образом, выбор величины K_l должен производиться в результате расчета объемных и энергетических показателей работы компрессора [1, 2]. Рекомендуется для компрессора с соотношением зубьев 4/6, с учетом геометрии винтов и рабочего процесса компрессора, выбирать K_l = 1,3…1,6 [1].

Эти рекомендации не учитывают влияние балластных утечек.

Применение в винтовых компрессорах подшипников качения вместо подшипников скольжения повышает КПД компрессора. Для увеличения ресурса работы подшипников используют специальные разгрузочные устройства: разгрузочные камеры — для уменьшения радиальных нагрузок, думмисы – для уменьшения осевых. Разгрузка осевых сил не приводит к большим протечкам сжимаемой среды на

всасывание. Использование разгрузочных устройств для разгрузки радиальных сил в маслозаполненных винтовых компрессорах средней и малой производительности приводит к снижению КПД компрессора из-за значительного увеличения протечек сжимаемой среды на всасывание и бывает неприемлемым. Для повышения КПД компрессора необходимо стремится к использованию подшипников качения [3].

Таким образом, при расчете КПД винтового компрессора необходимо учитывать величины реакций на опорах, позволяющих применить подшипники качения.

У винтового компрессора наибольшее значение имеет реакция на опоре ведущего винта на стороне нагнетания H_1 [3]. Для решения это оптимизационной задачи требуется найти минимальное значение целевой функции, обеспечивающей минимум H_1. Расчеты показывают, что минимум H_1 достигается при равенстве величин реакций на опорах ведущего винта на стороне нагнетания и всасывания B_1, то есть в качестве целевой функции можно выбрать величину $R = | H_1 - B_1|$. Для нахождения минимума R использован метод градиентного спуска [4–6]. В качестве оптимизирующих переменных, для профиля винтов, представленного на рис. 1, выбраны переменные K_l и. K_H

При величине K_l =0,9 при K_H =1,2 угол закрутки винтов $\tau_{1з}$= 360^0. (K_l / K_H) = 270^0. При K_l =1,5 при K_H =1,6 угол закрутки винтов $\tau_{1з}$ = $337{,}5^0$. Такие углы закрутки винтов обеспечивают уменьшение полезного объема парной полоски не более чем на 6%. Выберем диапазон изменения величины K_l =0,9…1,7.

Алгоритм градиентного метода может быть записан следующим образом. Значения оптимизирующих переменных вычисляется по их величинам на предыдущем шаге по формуле (1)

$$x_i^{[k+1]} = x_i^{[k]} - \lambda \cdot \frac{\partial R\left(X^{[k]}\right)}{\partial x_i} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial R\left(X^{(k)}\right)}{\partial x_i}\right]^2}, \qquad (1)$$

где: λ = const – величина шага; $x_1 = K_l$; $x_2 = K_H$; $X^{(k)} = \left(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}\right)$.

Так как определение целевой функции производится по программе расчета реакций на опорах, расчет значений производных $\partial R\left(X^{[k]}\right)/\partial x_i$, производится численным методом.

Остановка процесса нахождения минимума R происходит либо при выполнении условия $\left|R^{(k+1)} - R^{(k)}\right| \le \delta$, где δ – заданная малая величина, либо при достижении границы области допустимых значений.

По этой методике были проведены расчеты минимальных реакций H_1 для винтового компрессора с профилем винтов, приведенных на рис. 1.

При определении начальных значений K_l и K_H выбраны величины длины винтов и их хода для профиля винтов с соотношением числа зубьев z_1/z_2 = 4/6, приведенных выше.

Расчеты проводились для компрессора с z_1/z_2 =4/6, работающего на хладагентах *R*290, *R*404a и *R*717 в режиме с температурой конденсации $t_к$ = 30 ^{0}C и температурой кипения t_0 = - 35…-15 ^{0}C. Эти хладагенты, не содержащие атомов хлора, считаются полностью озонобезопасными (*ODP*=0) [7-10].

На рис. 2, 3 представлены результаты расчетов. На рис. 2 – зависимости изменения величин реакций на опоре ведущего винта H_1 от температуры кипения t_0 от начальных значений (н) до минимальных (к).

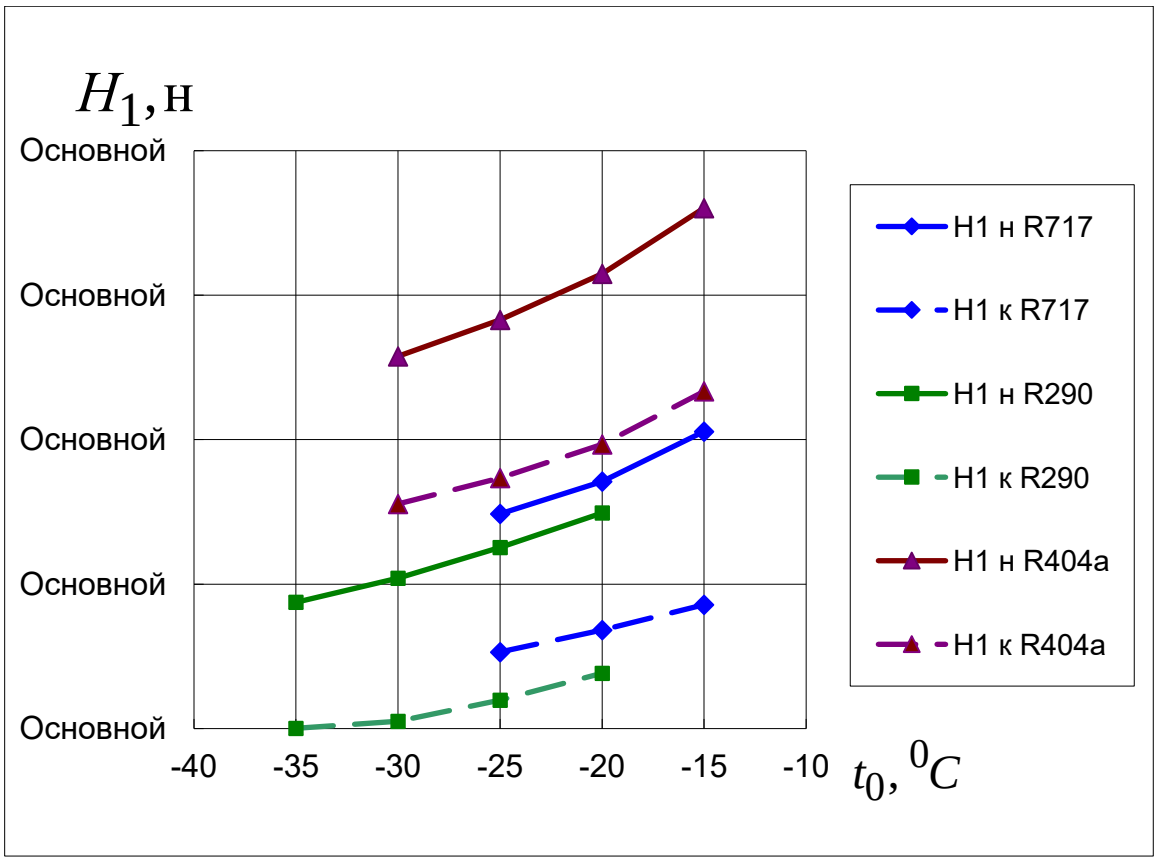


Рис. 2. Зависимости изменения величин реакций на опоре ведущего винта H_1 от температуры кипения t_0

■ – *R*290 ▲– *R*404a ◆ – *R*717

———— значения параметров в начале процесса оптимизации

– – – – – – – – – значения параметров в конце процесса оптимизации

На рис. 3 – зависимости изменения ресурса работы опорного подшипника на опоре ведущего винта со стороны нагнетания *Lh* (часов) от температуры кипения t_0. Расчеты проводились по методике, приведенной в [11]. Из рисунка видно, что при оптимальных значениях K_l и K_H ресурс работы подшипников для всех холодильных агентов превышает значение 40000 часов.

Величины K_l, при которых достигаются минимальные реакции H_1 находятся в диапазоне 1,2…1,3. При этом величины реакций на опорах ведущего винта уменьшаются на 15…20%, что позволяет существенно увеличить ресурс работы опорных подшипников качения, расширив тем самым область их применения. Таким образом, величины относительных длин винтов и относительных ходов, позволяющие уменьшить реакции на опорах, сдвигаются в сторону меньших значений по сравнению со значениями величин K_l и K_H, определенных в результате расчета объемных и энергетических показателей работы компрессора.

При определении оптимальных значений относительной длины винтов K_l и относительного хода ведущего винта K_H необходимо учитывать не только особенности рабочего процесса холодильного винтового компрессора, но и возможность применения в качестве опор подшипников качения. Выбор оптимальных значений K_l и K_H позволяет увеличить ресурс работы подшипников на 40…80%.

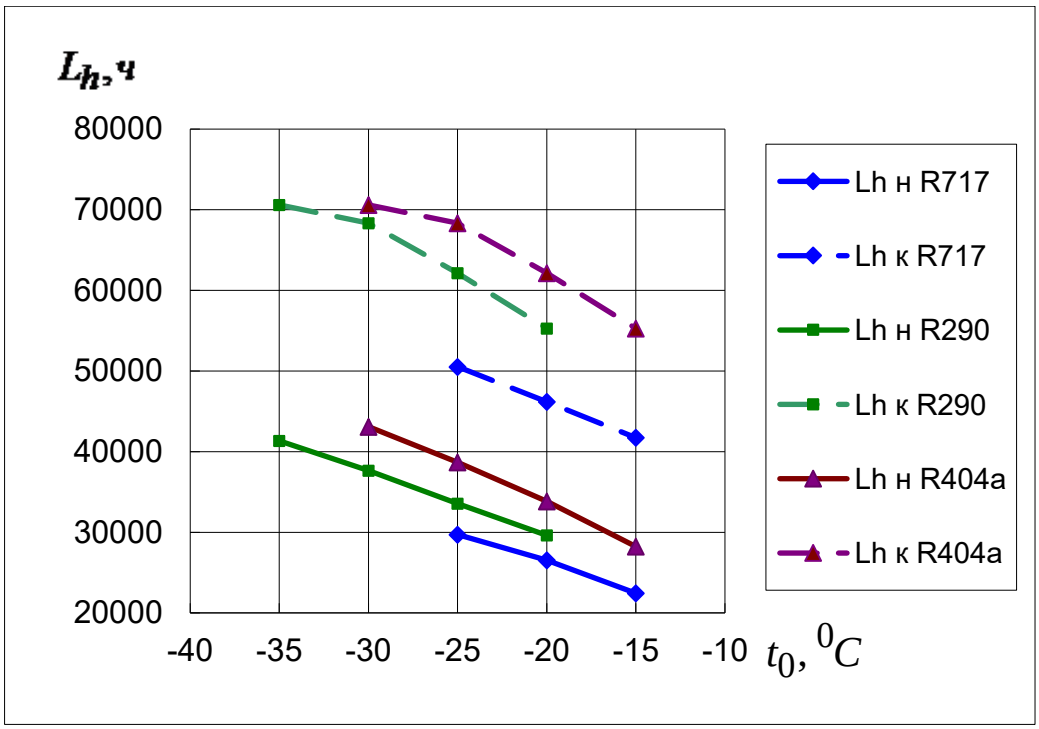


Рис. 3. Зависимости изменения ресурса работы опорного подшипника на опоре ведущего винта со стороны нагнетания *Lh* от температуры кипения t_0.
Обозначения такие же, как на рис. 2

Литература

1. Носков А.Н., Петухов В.В. Оценка эффективности теоретического профиля винтового компрессора // Вестник международной академии холода: М – С.-Пб., 2004. вып. 4. С. 4 – 7.
2. Ilie, K and Subic, A.: “Parametric modelling of helical rotors for efficient design of twin-screw superchargers”, Journal of Mechanical Engineering Science, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, 2006, London, UK.
3. Носков А.Н. Расчет сил и моментов, действующих на роторы винтового компрессора // Химическое и нефтегазовое машиностроение - 1997. - № 6. – С. 39-41.
4. Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization. – Cambridge University Press, 2004.
5. Bubeck S. Convex optimization: algorithms and complexity // In Foundations and Trends in Machine Learning. – 2015. – V. 8. – no. 3-4. – P. 231–357.
6. Nocedal J., Wright S. Numerical optimization. – Springer, 2006.
7. Cavallini A. Working Fluids for Mechanical Refrigeration // Proc. 19 th Int. Congress of Refrig., - The Hague, The Netherlands, August 20 – 25, 1995, – p. 25 – 42.
8. Sibley H.W. Alternative Refrigerrants: Potentional Impact on System Design // Proc. of Int. Conf. CFCs, The Day After Joint Meeting of IIR Commissions B1, B2, E1 and E2, - Padova, 21 – 23 Sept., 1994, - p. 49 – 55.
9. UNEP. Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer. As adjusted and amended by the second meeting of the parties: London, 1990.
10. Younglove B.A., Ely J.F. Thermophysical properties of fluids. II. Methane, ethane, propane, isobutene and normal butane // J. Phys. Ref. Data. – 1987. – Vol. 16, N 40. – P. 577–798.
11. Подшипники качения. Справочник. Под ред. Нарышкина В.Н. и Коросташевского Р.В. Л. Машиностроение, 1984 – 280 с.

УДК 621.577

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Н.О. Рачковский, Ю.В. Татаренко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

rachkovskiy.nikita@mail.ru, lavrtat@mail.ru

Аннотация
В настоящей статье рассмотрена возможность использования тепловых насосов в прибрежной зоне г. Санкт-Петербург. В результате исследования было установлено, что использование тепловых насосов целесообразно круглогодично в целях получения горячего водоснабжения, а также отопления.
Ключевые слова
Тепловой насос, рабочее вещество, холодильный агент, источник низкопотенциальной теплоты, отопление, горячее водоснабжение, коэффициент преобразования, *COP*.

Введение

В настоящее время тепловые насосы занимают важное место в развитии альтернативной энергетики на возобновляемых источниках энергии. В центральной (Великобритания, Германия, Франция, Швейцария) и северной Европе (Норвегия, Швеция, Финляндия), а также в Китае и Японии тепловые насосы активно применяются для отопления и горячего водоснабжения.

Большая часть европейских стран не обладают термальными ресурсами, за исключением Венгрии, Исландии, Франции [1]. В большинстве стран в качестве источника низкопотенциальной теплоты используется теплота водоносных горизонтов, теплота грунта, горная порода или теплота воды из естественного водоёма. Энергетическая эффективность и производительность теплового насоса в большой степени определяется температурой и тепловой мощностью источника низкопотенциальной теплоты: повышение температуры испарения в цикле теплового насоса положительно отражается на значении отопительного коэффициента *COP* при условии поддержания заданной температуры конденсации [2], [3]. Количество теплоты, получаемое от источника низкопотенциальной теплоты, прямо влияет на его эффективность и на период окупаемости [4], [5].

Тепловые насосы, которые в качестве источника низкопотенциальной теплоты используют грунтовые воды или водоёмы с точки зрения энергетической эффективности являются выгодными [6].

Например в Южной Швейцарии (кантон Тичино) примерно 7% потребности в отоплении покрывается при помощи альтернативных источников энергии, в том числе тепловых насосов [7].

Если обратиться к опыту ФРГ, то к концу 2016 года доля возобновляемых источников энергии в валовом потреблении электроэнергии в ФРГ составила почти 32%, по сравнению с 3% в начале 1990-х годов. Напротив, доля возобновляемой энергии в конечном спросе на энергию для отопления и охлаждения составляла всего около 13% в 2016 году по сравнению с 2% в 1990 году [8], [9].

Необходимо отметить, что развивающиеся страны также уделяют большое внимание развитию альтернативной энергетики на тепловых насосах. Хорошим

примером служит Китайская Народная Республика. В последние несколько лет в КНР уделяется внимание энергосбережению и выбросов парниковых газов. В связи с этим были приняты ряд законов и постановлений правительства касающиеся применения возобновляемых источников энергии и энергосбережения в целом [10].

Цель исследования

Получение значений коэффициента преобразования теплового насоса в зависимости от изменяющейся температуры источника низкопотенциальной теплоты.

Методы исследования

В настоящей работе объектом исследования является тепловой насос с одноступенчатым сжатие рабочего вещества. Источником низкопотенциальной теплоты является теплота воды природного водоёма (озеро, залив, река, море). Передача теплоты от теплового насоса к потребителю осуществляется промежуточным теплоносителем – водой. Принципиальная схема теплового насоса представлена на рис. 1.

Для анализа работы теплового насоса были выбраны следующие рабочие вещества (холодильные агенты): *R134a* и *R410a*.

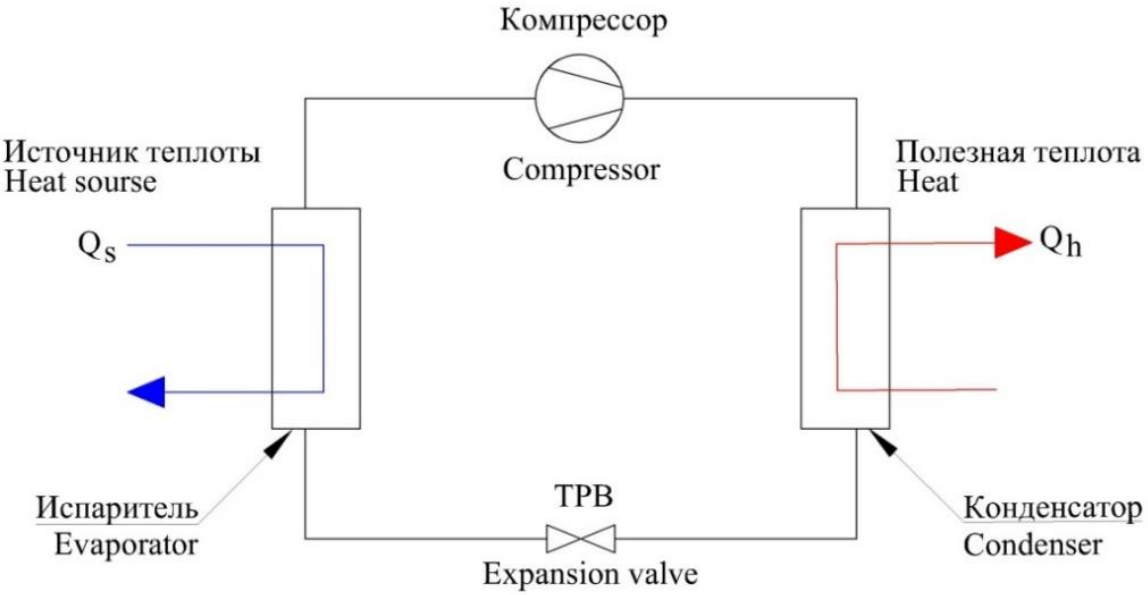


Рис. 1. Принципиальная схема теплового насоса

Результаты исследования

Исследование работы теплового насоса производилось при следующих исходных данных: диапазон температур источника низкопотенциальной теплоты t_s: от 0^oC до $+19.74^oC$, температура конденсации $t_к$=51^oC, полезная теплота Q_h = 10 кВт. Результаты расчётов представлены в таб. 2, где Q –теплота, полученная от источника низкопотенциальной теплоты, кВт, W – электрическая мощность, затрачиваемая компрессором на сжатие рабочего вещества, COP – коэффициент преобразования теплового насоса. В качестве источника низкопотенциальной теплоты принята теплота Финского залива Балтийского моря. Данные приняты в соответствии с [11] и представлены в таб. 1.

Таблица 1

Температура воды прибрежной зоны Балтийского моря

№	Платформа: идентифика-тор локальный	t_s по месяцам, ℃											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Ломоносов	-0,03	-0,07	0,04	2,06	10,42	16,27	19,52	18,51	13,47	7,48	2,42	0,38
2	Кронштадт	0,03	0,0	0,18	3,01	11,79	17,01	19,96	18,63	13,3	7,01	2,02	0,34
Среднее значение		0,0	-0,35	0,11	2,54	11,11	16,64	19,74	18,57	13,39	7,25	2,22	0,36

Коэффициент преобразования цикла теплого насоса определён по следующей зависимости и зависит от полезной теплоты Q_h и затраченной электрической энергии на привод компрессора W:

$$COP = \frac{Q_h}{W} \quad (1)$$

Таблица 2

Основные характеристики теплового насоса

Параметр	t_s, ℃											
	0,0	-0,35	0,11	2,54	11,11	16,64	19,74	18,57	13,39	7,25	2,22	0,36
Рабочее вещество *R134a*												
Q, кВт	7,760	7,744	7,765	7,877	8.260	8.499	8.629	8.580	8.360	8.090	7.862	7.777
W, кВт	2,128	2,144	2,123	2,008	1.616	1.371	1.237	1.287	1.514	1.791	2.023	2.111
COP	4,699	4,664	4,710	4,980	6,188	7,294	8,084	7,770	6,605	5,583	4,943	4,737
Рабочее вещество *R410a*												
Q, кВт	7,586	7,570	7,591	7,704	8.095	8.339	8.474	8.423	8.196	7.920	7.689	7.603
W, кВт	2,290	2,307	2,284	2,167	1.758	1.499	1.357	1.410	1.651	1.94	2.182	2.272
COP	4,367	4,335	4,378	4,615	5,688	6,671	7,369	7,092	6,057	5,155	4,583	4,401

Следует отметить, что коэффициент преобразования является наиболее важным параметром при оценке эффективности работы теплового насоса.

На основании данных, представленных в таб. 2, построены зависимости основных характеристик теплового насоса рис. 2. Методика построения данных характеристик приведена в литературе [12 – 14].

Анализируя график, представленный на рис. 2, можно говорить о том, что коэффициент преобразования в период с ноября по апрель (6 месяцев) изменяется слабо и применять тепловой насос можно как для отопления, так и для горячего водоснабжения. Резкий рост значения наблюдается с мая по июль, что обусловлено ростом температуры источника низкопотенциальной теплоты t_s. В период с мая по октябрь применение теплового насоса возможно только для горячего водоснабжения в связи с отсутствием потребности в отоплении. Количество отбираем теплоты Q в течении года изменяется слабо. Необходимо отметить, что на увеличение значения *COP* в период с мая по октябрь сильное влияние оказывает снижение потребляемой мощности компрессором W, которое затрачивается на сжатие рабочего вещества. Разница значений коэффициентов преобразования рассматриваемых рабочих веществ изменяется в интервале от 7,58% до 9,70% в зависимости температуры источника низкопотенциальной теплоты t_s.

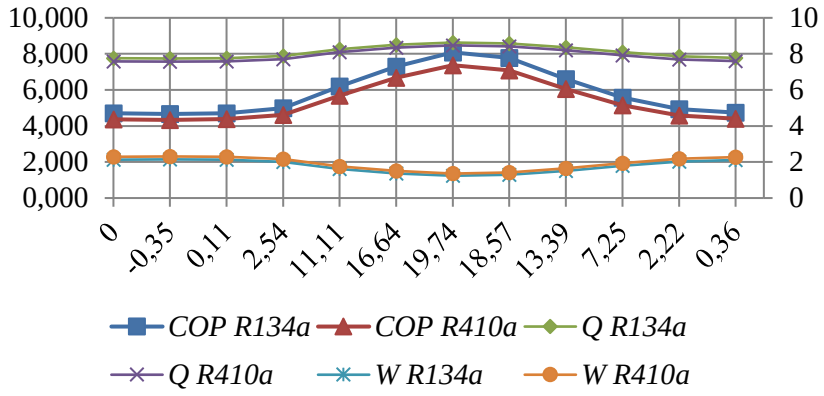


Рис. 2. График зависимости основных характеристик теплового насоса от температуры t_s

Выводы

Не смотря на значительные капитальные затраты, применение тепловых насосов позволяет сократить эксплуатационные затраты, а в случае дефицита энергии является весьма эффективным способом для получения тепловой энергии, по сравнению с электрическими нагревателями. Количество электроэнергии W, затрачиваемое на привод компрессора по отношению к получаемой полезной теплоте Q_h не превышает значения 23,1%.

Литература

1. Rybach L., Sanner B., Ground-source heat pump systems the european experience // GHC BULLETIN – march 2000. – С. 16 – 26.
2. Sivasakthivel, T., Murugesan, K., Thomas, H.R., Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept. // Appl. Energy – p 2014, – С. 76–85.
3. Zarrella, A., De Carli, M., Heat transfer of short helical borehole heat exchnagers. // Appl. Energy – 2013, – С. 1477–1491.
4. Neuberger P., Adamovský R. Analysis and comparison of some low-temperature heat sources for heat pumps Energies – 2019. – №12, –С. 1853.
5. Hepburn, B.D.P., Sedighi, M.; Thomas, H.R., Field-scale monitoring of a horizontal ground source heat system. // Geothermics – 2016. – № 61, – С. 86–103.
6. Choi, W.; Ooka, R.; Nam, Y., Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas. // Sustain. Cities Soc. – 2018 – №38, – С. 429–439.
7. Perego R., Pera S., Galgaro A. Techno-economic mapping for the improvement ofshallow geothermal management in Southern Switzerland // Energies – 2019 – № 12, – С. 279.
8. Bauermann K. German energiewende and the heating market – impact and limits of policy // Energy Policy – 2016. – №94. – С. 235-246.
9. Bloess A., Schill W.-P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // Applied Energy Volume – February 2018, – С. 1611-1626.
10. Fang Z., Diao N., Fang L. The ground-coupled heat pump technology in china International Geothermal Conference // IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – 2019. – С. 249.

11. Климат морей России [Электронный ресурс] // Портал Единой государственной системы информации об обстановке в мировом океане. URL: http://portal.esimo.ru/.
12. Татаренко Ю.В., Введение в математическое моделирование характеристик паровых компрессорных холодильных машин. – СПб.: Университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий, 2015. – 98 с.
13. Морозюк Т.В., Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
14. Atwan A.F., Kasim N.K., Khudhair W.A. Effect of geothermal heat pump on carbon dioxide emissions // International journal of scientific & technology research. – october 2016. – № 5 (10). – С. 175-178.

УДК 621.52/39 – 181.4

ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ФОТОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВ

А.В. Самвелов[1], С.Г. Ясев[1], О.В. Пахомов[2], А.С. Москаленко[1], К.С. Павлов[1]

1 – Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», г. Лыткарино, Москвская обл., Россия
2 – Университет ИМО, Санкт-Петербург, Россия

samv-andrej@yandex.ru

Аннотация
Одним из существующих методов охлаждения тел является охлаждение на основе электрокалорического эффекта. Электрокалорическим эффектом (ЭКЭ) называют изменение температуры магнетика в результате обратимого выделения или поглощения тепла при воздействии электромагнитного поля на вещество в адиабатических условиях. В настоящее время получено большое количество соединений и твёрдых растворов, в которых наблюдается высокий электрокалорический эффект. Это находит применение и в микрокриогенной технике [1 – 5].
Ключевые слова
Микрокриогенная система, фотоприёмное устройство ,электрокалорический эффект.

Существует элемент, обладающий относительно высоким электрокалорическим эффектом, а именно, нанокристаллический диспрозий (Dy) [6, 7], который имеет широкий интервал между температурами Кюри и Нееля, перекрывающий диапазон рабочих температур большинства «высокотемпературных» детекторов. При адиабатном размагничивании диспрозия в интервале температур Кюри и Нееля (T_C = 85 K, T_N = 178 K) наблюдается достаточно высокий электрокалорический эффект. Эффект проявляется и при изотермических условиях, когда рабочий элемент из диспрозия намагничивают в электромагнитном поле, при этом он нагревается, тепло сбрасывается в окружающую среду, а затем (при отключении электромагнитного поля) материал размагничивается и его температура понижается (на разупорядочивание структуры образца диспрозия тратится внутренняя энергия вещества).

Разработанная микрокриогенная система (МКС) предназначена для криостатирования матричного фотоприёмного устройства с охлаждением в первой ступени за счёт термодинамического регенеративного цикла Стирлинга. Во второй, низкотемпературной ступени МКС, установлен дополнительный охладитель на основе электрокалорического эффекта, который включает в себя магнитокалорический рабочий элемент из диспрозия, электрообмотку для подачи электрического тока с целью получения магнитного поля и электровводы.

Данная МКС специально разработана для охлаждения наиболее перспективных на сегодняшний день фотоприёмных устройств: «высокотемпературных» фотодетекторов на основе теллуридов кадмия-ртути, сверхрешёток 2-го типа, *XBn*-структур и др., работающих в температурном диапазоне 110–150 К [8, 9]. МКС обеспечивает повышение эффективности процесса охлаждения при пониженных значениях массы и габаритов всей системы.

Целью данных исследований является расширение температурного диапазона криостатирования микрокриогенной системы Стирлинга и повышение термодинамического КПД при пониженных массе и габаритах в диапазоне температур

криостатирования 110–150 К.

На рисунке представлен охладитель разработанной МКС с электрокалорической ступенью.

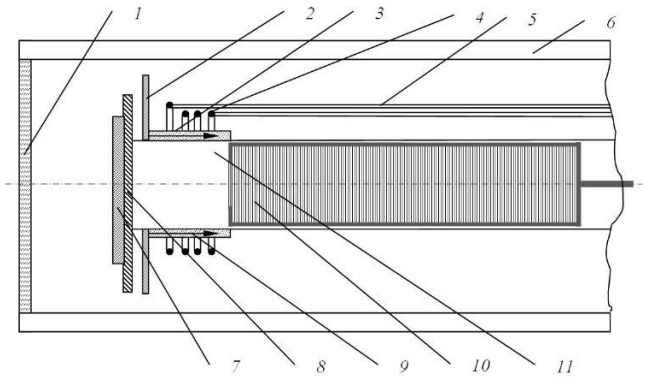


Рисунок. Охладитель МКС Стирлинга с электрокалорической ступенью охлаждения. 1 – оптическое окно; 2 – защитный антимагнитный экран; 3 – электрокалорический рабочий элемент из диспрозия (ступень дополнительного охлаждения); 4 – электрообмотка; 5 – электровыводы; 6 – вакуумный теплозолирующий корпус; 7 – охлаждаемый объект; 8 – держатель охлаждаемого объекта; 9 – направление магнитного поля; 10 – детандер со встроенным регенеративным теплообменником (основная ступень охлаждения); 11 – полость расширения

Основная ступень охлаждения в представленной микрокриогенной системе работает по замкнутому обратному регенеративному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла при постоянном количестве рабочего вещества (криоагента), в качестве которого используется газообразный гелий. Ступень дополнительного охлаждения представляет собой магнитокалорический охладитель, включающий в себя кольцеобразный рабочий элемент из диспрозия (поз. 3) и электрообмотку (поз. 4).

Работа ступени дополнительного охлаждения осуществляется следующим образом. Детандер со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10), реализуя цикл Стирлинга, выполняет расширение предварительно изотермически сжатого газа-криоагента в полости расширения (поз. 11), перемещаясь вправо, в результате чего рабочий газ охлаждается. Когда детандер со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) находится в крайнем левом положении, на электрообмотку (поз. 4) электрокалорической ступени охлаждения подаётся напряжение, индуцирующее внутри кольцевого сегнетоэлектрика магнитное поле с напряженностью H = 60 кЭ. В процессе перемещения детандера со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) вправо электрообмотка (поз. 4) обесточивается, магнитное поле, соответственно, сбрасывается с диспрозиевого магнитокалорического рабочего элемента (поз. 3). Таким образом, происходит адиабатическое размагничивание диспрозия, и, вследствие этого, реализуется дополнительное охлаждение криоагента в полости расширения (поз. 11).

Процесс адиабатического размагничивания при магнитокалорическом эффекте описывается выражением:

$$\Delta T_H = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S \Delta H,$$

где H – напряжённость электромагнитного поля, Э; T – температура, К; S – энтропия, Дж/кг.

Обе ступени криостатирования работают согласовано во времени. При выходе микрокриогенной системы на режим криостатирования частота перемещений

детандера со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) снижается, что даёт возможность корректной реализации электрокалорического эффекта, поскольку при повышенных частотах из-за наличия магнитного гистерезиса эффекта можно не получить. Вторая ступень позволит дополнительно понизить температуру криостатирования на 5–6 К.

Разработанная микрокриогенная система Стирлинга с электрокалорической ступенью криостатирования позволит обеспечить дополнительное понижение температуры криостатирования на 5–6 К, значительно понизить массогабаритные показатели (на 30–35%) и энергопотребление микрокриогенной системы (на 20–35%). МКС может найти применение для криостатирования «высокотемпературных» фотодетекторов, работающих в диапазоне температур криостатирования 110–150 К, причем при достаточно высокой эффективности системы [10].

Результатом исследований является разработка микрокриогенной системы, работающей по обратному циклу Стирлинга, причем с повышенной эффективностью цикла за счёт малозатратного охлаждения во второй ступени и уменьшением массогабаритных характеристик по сравнению с традиционными системами.

В результате достигается снижение массы на 20–25%, общих габаритных размеров до 30% и повышение КПД на 25–30% при работе в температурном диапазоне 110–150 К.

Разработана двухступенчатая микрокриогенная система для криостатирования «высокотемпературного» класса фотодетекторов на основе газовой криогенной машины Стирлинга с электрокалорическим эффектом охлаждения во второй ступени на основе диспрозия (Dy). В первой ступени реализуется изотермическое расширения рабочего тела (газообразного гелия) с подводом тепла от объекта охлаждения. Во второй ступени предварительно охлаждённый в первой ступени гелий окончательно охлаждается при адиабатическом размагничивании диспрозия, заполняющего «холодную» область регенеративного теплообменника МКС. Это позволяет снизить температуру криостатирования на 5–6 К, повысить эффективность охлаждения, а также уменьшить массу и габариты системы в целом.

Литература

1. Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.Е. / Криогенная техника // М.: Энергия. 1974.
2. Архаров А.М. // Низкотемпературные газовые машины / М.: Машиностроение. 1969.
3. Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтораус В.Б. / Криогенные машины. // С.-П.: Политехника. 1991.
4. Трошкин Ю.С., Чапкевич А.Л., Горбунов Е.К., Посевин О.П., Самвелов А.В. / Микрокриогенная система с газовой криогенной машиной Стирлинга интегрального типа для охлаждения фоточувствительных элементов // Москва. Прикладная физика. 1999. № 3. С. 60-65.
5. Суслов А.Д. / Криогенные газовые машины // М.: Машиностроение. 1982.
6. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р. // Материаловедение // Магнитогорск. 2014.
7. Карагусов В.И., Карагусова Н.В. / Установки и системы микрокриогенной техники. Учебное пособие // Омск: ОмГТУ. 2010.
8. Ханник Р., Хилл А. / Наноструктурные материалы // М.: Техносфера. 2009.
9. Рамбиди Н.Г., Берёзкин А.В. / Физические и химические основы нанотехнологий. // М.: Физматлит, 2009.
10. Самвелов А.В., Ясев С.Г., Москаленко А.С., Старцев В.В., Пахомов О.В. Микрокриогенная система стирлинга с комбинированным регенератором и магнитокалорической ступенью охлаждения. Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 496-499.

УДК 621.56

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО АГРЕГАТА

Ю.В. Татаренко, В.В. Митропов, А.А. Никитин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

lavrtat@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена математическая модель компрессорно-конденсаторного агрегата на базе поршневого компрессора с частотным регулированием. Исходными данными для модели приняты: температуры и относительная влажность окружающей среды и охлаждаемого помещения, а также геометрические параметры основных элементов агрегата. При расчете термодинамических и теплофизических параметров использовалась библиотека CoolProp. В статье приведена блок-схема расчета компрессорно-конденсаторного агрегата. Проведена оценка влияния изменения относительной влажности окружающей среды на коэффициент теплопередачи конденсатора.

Ключевые слова

Моделирование, компрессор, воздушный конденсатор, компрессорно-конденсаторный агрегат

С конца 20 века тема рабочих веществ в холодильной технике и промышленности не теряет своей актуальности. Для контроля над «распространением веществ, разрушающих озоновый слой Земли, был разработан Монреальский протокол — международный договор, который служит для защиты озонового слоя. Это по замыслу разработчиков Монреальского соглашения было осуществлено с целью запрета распространения и использования некоторых химических озоноразрушающих рабочих веществ», как представлено в документе [1].

Договор был подготовлен к подписанию 16 сентября 1987 года и вступил в силу 1 января 1989 года. При соблюдении условий подписанного договора всеми странами планеты к 2050 году было высказано предположение о восстановлении озонового слоя Земли. Страны Европейского Союза в настоящее время активно переводят технику на озонобезопасную, многие объекты, вводимые в эксплуатацию, проектируются на диоксиде углерода, который является альтернативным хладагентом [2].

В январе 2019 г была принята Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу, в которой оговаривается дальнейший отказ от многих групп холодильных агентов во всем мире, применяемых в холодильной и низкопотенциальной энергетике [3].

Поэтому расчет и моделирование статических характеристик компрессорных холодильных машин весьма актуален. При данном моделировании предусматривается возможность определить многочисленные свойства холодильных машин при различных режимах работы, а также, что особенно ценно, при переводе уже эксплуатируемой холодильной машины на другое рабочее вещество– альтернативное [4].

При создании математической модели работы компрессорно-конденсаторного агрегата необходимо иметь точные геометрические параметры элементов. К такому выводу пришли авторы работы [5], которые с помощью математического моделирования получили характеристики холодильной машины, работающей на

смесевом холодильном агенте. Авторы [5] пришли к выводу, что на характеристику системы в значительной степени влияют начальные условия, геометрические параметры аппаратов, тип элементов из которых состоит холодильная машина, таких как конденсатор и испаритель.

В стремлении сократить потребление энергии многие исследователи в области охлаждения и кондиционирования воздуха сосредоточились на исследовании методов регулирования производительности одного из основных элементов холодильной машины, а именно компрессора. Регулирование производительности снижает циклические потери оборудования и повышает надежность компрессора за счет снижения разности давлений при работе с частичной производительностью [3].

Существует множество методов регулирования производительности, а именно: метод байпаса, подключение дополнительного мертвого пространства, дросселирование пара на всасывании и плавное изменение частоты вращения вала. Характеристики при использовании вышеописанных способов регулирования производительности компрессора описаны авторами Tassou S.A. и Qureshi T.Q. [8] и авторами [9 – 10].

В данной работе рассматривается математическая модель компрессорно-конденсаторного агрегата на базе поршневого компрессора с частотным регулированием.

Данные расчёта характеристик элементов одноступенчатого компрессорно-конденсаторного агрегата на основе поршневого компрессора получаются при помощи реализованных подпрограмм, а именно характеристик компрессора – подпрограмма ХАР_КМ и характеристики конденсатора – подпрограмма ХАР_КД, которые сведены в единую программу ХАР_КМКД. Блок-схема программу ХАР_КМКД представлена на рисунке 1.

Известными входными сигналами является температура воздуха в помещении и температура окружающей среды. Используя эти условия входа, имея геометрические параметры компрессора и воздушного конденсатора можно рассчитать все параметры компрессорно-конденсаторного агрегата при заданных температурах, как по воздуху так и по рабочему веществу.

Основные термодинамические и теплофизические свойства реальных рабочих веществ рассчитываются при помощи библиотеки свойств *CoolProp* [12]. Данная библиотека поддерживается большинством используемых в математическом моделировании программ и языков программирования, имеет бесплатное распространение.

Основные уравнения и алгоритмы, элементов компрессорно-конденсаторного агрегата с поршневым компрессором, реализуемые на ЭВМ, основаны на материале, изложенном в работе [6].

При моделировании были сделаны следующие допущения:

– Перегрев холодильного агента на всасывании является постоянной величиной для всех рассматриваемых режимов работы компрессорно-конденсаторного агрегата.

– Все элементы компрессорно-конденсаторного агрегата соединены последовательно и массовый расход через эти элементы неизменен.

– Переохлаждение хладагента ниже температуры конденсации для всех режимов равно нулю.

Хотелось бы отметить, что для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации внутри горизонтальных труб используется модельное уравнение Ackers и Rosson (1960) в виде [7]:

$$Nu = 0{,}1 \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \left(\frac{r}{c_p \Delta t} \right)^{1/6} \mathrm{Re}^{2/3} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где ρ_l , ρ_v – соответственно плотности жидкости и пара, кг/м^3; c_p – теплоемкость кДж/(кг·К), м; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг

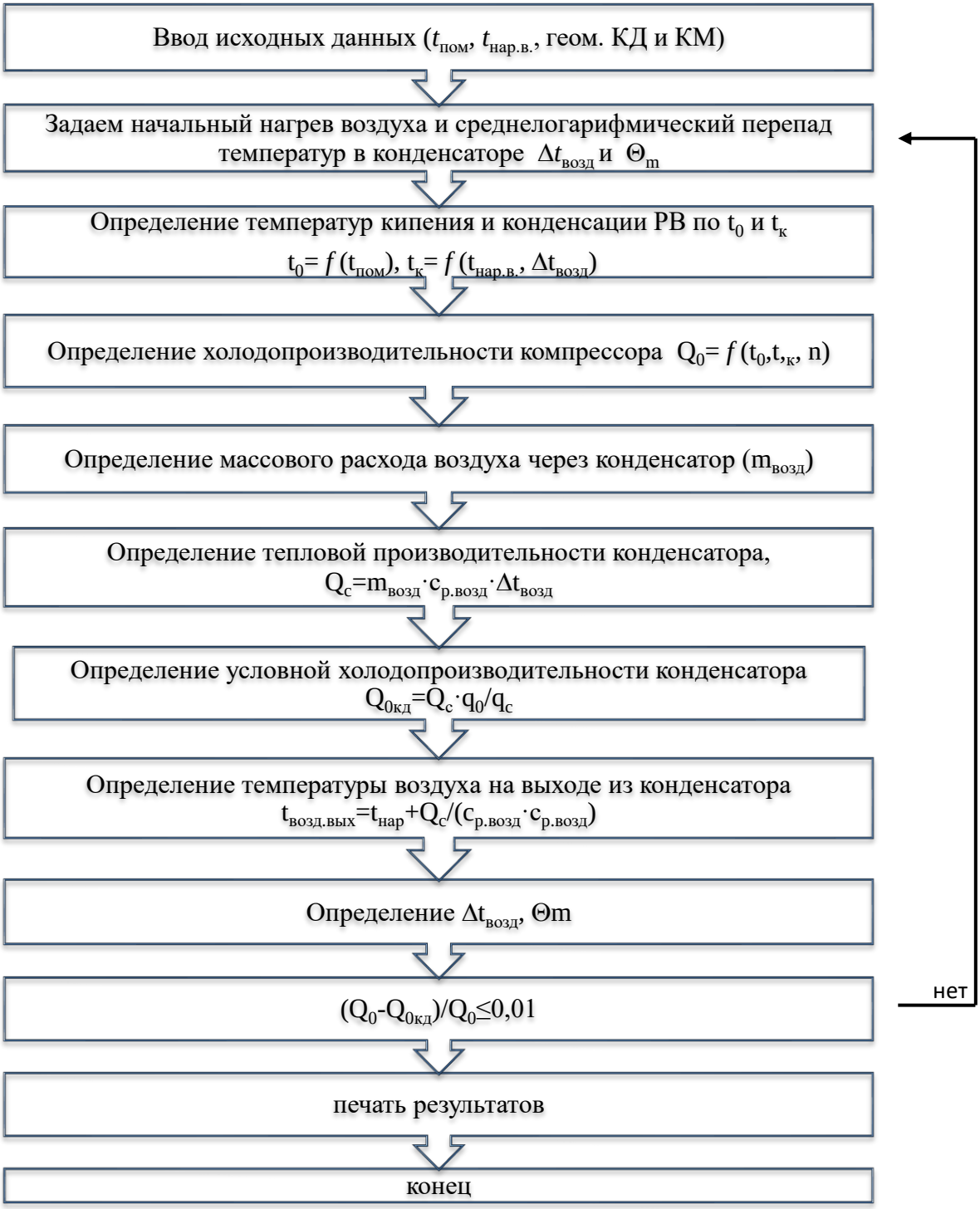


Рис. 1. Блок-схема программы, реализующей расчет характеристик компрессорно-конденсаторного агрегата

При рассмотрении конвективного теплообмена при обтекании пучка труб со стороны воздуха используется универсальная формула, учитывающая тип пучка, исходные данные для расчета принимаются одни и те же. Таким образом, при сравнении проведенных расчетов с расчетами, выполненными по формуле Д.М. Иоффе для шахматных пучков [11] погрешность расчетов не превысила 1%:

$$Nu = c\,\mathrm{Re}^{n}\left(\frac{L}{d_э}\right)^{m}, \qquad (2)$$

где L – длина поверхности в направлении потока.

При рассмотрении полученных данных в результате работы программы по алгоритму, представленному на рис. 1 можно сделать вывод о влиянии величины разности температур воздуха на входе и выходе из конденсатора воздушного охлаждения и среднелогарифмического напора в аппарате. При рассмотрении влияния относительной влажности воздуха на входе в конденсатор установлено, что оно оказалось незначительным. Максимальное расхождение разности температур на входе и выходе из воздушного конденсатора проявляется только при температурах окружающей среды более 45°С и составляет около 3%. Данные характеристики представлены на рис. 2, как зависимости $\theta_m = f\left(t_{\text{ос}}, t_{\text{к}}\right)$ и $\Delta t_{\text{возд}} = f\left(t_{\text{ос}}, t_{\text{к}}\right)$.

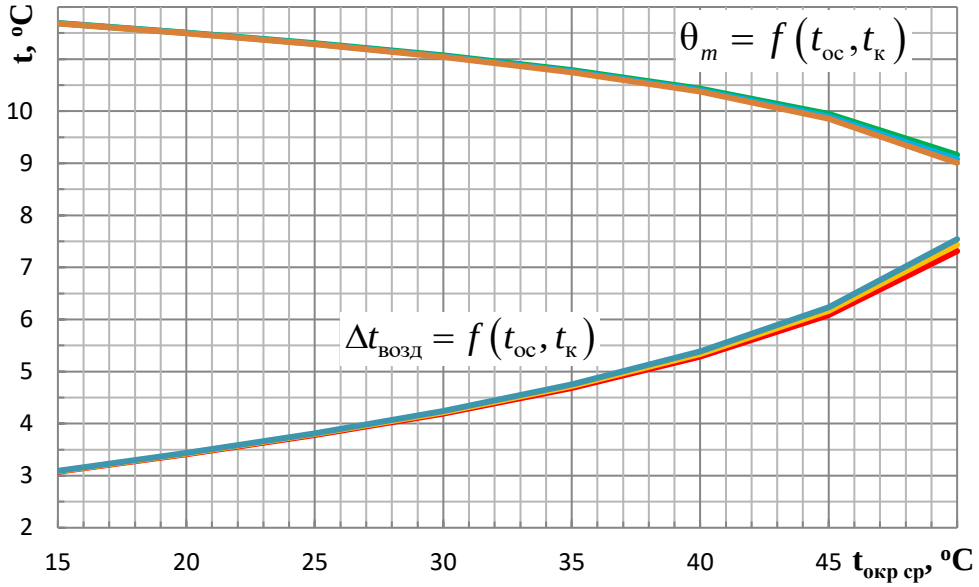


Рис. 2. Характеристики воздушного конденсатора

Выводы:

1. Создана математическая модель компрессорно-конденсаторного агрегата, с помощью которой возможно получить параметры агрегата при работе на любом рабочем веществе и режиме работы.

2. При расчете коэффициента теплопередачи можно не учитывать влияние относительной влажности окружающей среды. По проведённым расчетам установлено, что ее влияние сказывается незначительно.

3. Необходимо продолжить данное исследование, включив в математическую модель подпрограмму работы испарителя для анализа работы всей холодильной машины в целом.

Литература

1. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2014. Assessment. ISBN: 978-9966-076-09-0.
2. Цветков О.Б. Посткиотские тенденции и синдромы устойчивого развития техники низких температур [Текст] / Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. // /Холодильный бизнес –№ 3. – 2015. – С. 22–27.
3. Цветков О.Б. Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу: ретроспектива эволюции или будущего зов? [Текст] / Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. // Холодильная техника – № 3. – 2019. – С. 2–8.
4. Цветков О.Б., Забодалова Л.А., Лаптев Ю.А., Митропов В.В., Пятаков Г.Л. Выбор холодильных агентов // Молочная промышленность – 2018. – № 9. – С. 21-22.
5. Orth, L.A., Zietlow, D.C., and Pedersen, C.O., ASHRAE Trans., 1995, vol.23, pp. 1367-1375.
6. Татаренко Ю.В. Введение в математическое моделирование характеристик паровых компрессорных холодильных машин [Текст]: учеб.пособие / – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 100 с.
7. 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook (SI).
8. Tassou, SA. and Qureshi, TQ. 'Dynamic mode performance evaluation and energy analysis of mains and inverter driven refrigeration compressors'. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 211 (4). pp. 339 - 346. ISSN: 0957-6509.
9. Холодильные машины: Учебник для студентов втузов специальности «Техника и физика низких температур» / Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С.; Под общей редакцией Тимофеевского Л. С. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
10. Поршневые компрессоры: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки»/ Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И.; под общ. ред. Фотина Б.С. – Л: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 372 с.
11. Теплообменные аппараты холодильных установок / Данилова Г.Н. и др., – Л.: Машиностроение, 1986. – 304 с.
12. CoolProp [http://www.coolprop.org/].

УДК 621.565.83, 697.97

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ЦИКЛА РАБОТЫ УСТАНОВКИ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

А.П. Цой[1], А.С. Грановский[1], Д.А. Цой[2], А.В. Бараненко[2]

1 – Алматинский технологический университет, г. Алматы, Респ. Казахстан
2 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

teniz@bk.ru

Аннотация
В работе на основе данных о погоде в городе Алматы за 23 августа 2018 года при помощи разработанной компьютерной модели произведено исследование суточного цикла работы холодильной установки, в которой охлаждение воды производится за счёт ночного радиационного охлаждения. Установка используется для поддержания температуры воздуха в закрытом помещении с габаритными размерами 3х4 м и высотой 3 м. При температуре атмосферного воздуха до +26,4°С, за счет работы установки температура воздуха в помещении поддерживалась в диапазоне от +15,7 до +18,9°С, энергопотребление за сутки достигло 0,83 кВт·ч, а средний удельный сброс тепла радиаторами составил 55 Вт/м^2.

Ключевые слова
Радиационное охлаждение, эффективное излучение, естественное охлаждение, холодильная техника, компьютерное моделирование.

Радиационное охлаждение (далее РО) – способ понижения температуры охлаждаемого объекта, основанный на сбросе тепла в виде инфракрасного излучения в ночное время через атмосферу планеты в окружающее космическое пространство [1, 2]. Данный способ охлаждения можно использовать для создания холодильной установки, в которой жидкий теплоноситель охлаждается в радиаторах в ночное время, и после этого подается в воздухоохладитель, где забирает тепло от охлаждаемого воздуха [3, 4].

Холодильные установки, использующие РО, не требуют значительных затрат энергии для осуществления охлаждения, и теоретически могут иметь высокий уровень энергоэффективности. Однако исследование установок РО связано с необходимостью учета множества переменных факторов (климатических условий, конструктивных особенностей отдельных элементов), что значительно затрудняет проведение исследований [5]. В связи с этим с целью изучения особенностей функционирования установки РО разработана усовершенствованная компьютерная модель, учитывающая детально процессы теплообмена, происходящие в отдельных элементах установки, а также рассчитывающая её фактический уровень энергопотребления.

При помощи разработанной модели, после её проверки на основе полученных ранее экспериментальных данных [6], произведено исследование работы установки РО, изображенной на рис. 1. В качестве теплоносителя в установке используется вода. Установка имеет два гидравлических контура. По первому гидравлическому контуру вода подается в радиаторы. По второму гидравлическому контуру вода подается к воздухоохладителю.

В качестве аккумулятора холода А используется кубическая ёмкость с 1028 кг воды. Стенки аккумулятора холода теплоизолированы слоем минеральной ваты толщиной 25 мм.

Воздухоохладитель ребристо-трубной конструкции с навитыми ребрами имеет площадь теплообменной поверхности 7 м^2, шаг между ребрами 4 мм и вентилятор с потребляемой мощностью электродвигателя 18 Вт. Объемный расход воздуха, создаваемый вентилятором – 716 м^3/час. Расчет холодопроизводительности воздухоохладителя производится по формулам из [7, с. 773].

В установке используются циркуляционные насосы с мокрым ротором. Насос Н1, подающий воду в радиаторы, создает массовый расход 0,2 кг/с, а насос Н2, подающий воду в воздухоохладитель, создает массовый расход 0,05 кг/с.

Радиаторы пластинчато-трубной конструкции закреплены на крыше здания с малым уклоном к горизонту и имеют общую площадь излучающей поверхности 12 м^2. Расчет количества тепла, сбрасываемого в виде инфракрасного излучения радиаторами выполняется по методике из работы [8]. Также учитываются конвективные теплопритоки к излучающей поверхности, а также приток тепла через теплоизоляционный слой под излучающей поверхностью.

Насос первого контура с радиаторами работает между закатом и восходом Солнца (с 19:45 до 6:07). При этом через каждый час работ он отключается на 10 минут. Насос второго контура и вентилятор воздухоохладителя включены все время.

Установка используется для охлаждения закрытого помещения с габаритными размерами 4х3х3 м, стены которого выполнены из панелей с минеральной ватой толщиной 50 мм.

Моделирование проведено на основе данных о погоде в городе Алматы (Казахстан) за 23 августа 2018 года. В указанный день отсутствовала облачность (см. кривую 6 на рис. 2б) и наблюдалась низкая скорость ветра.

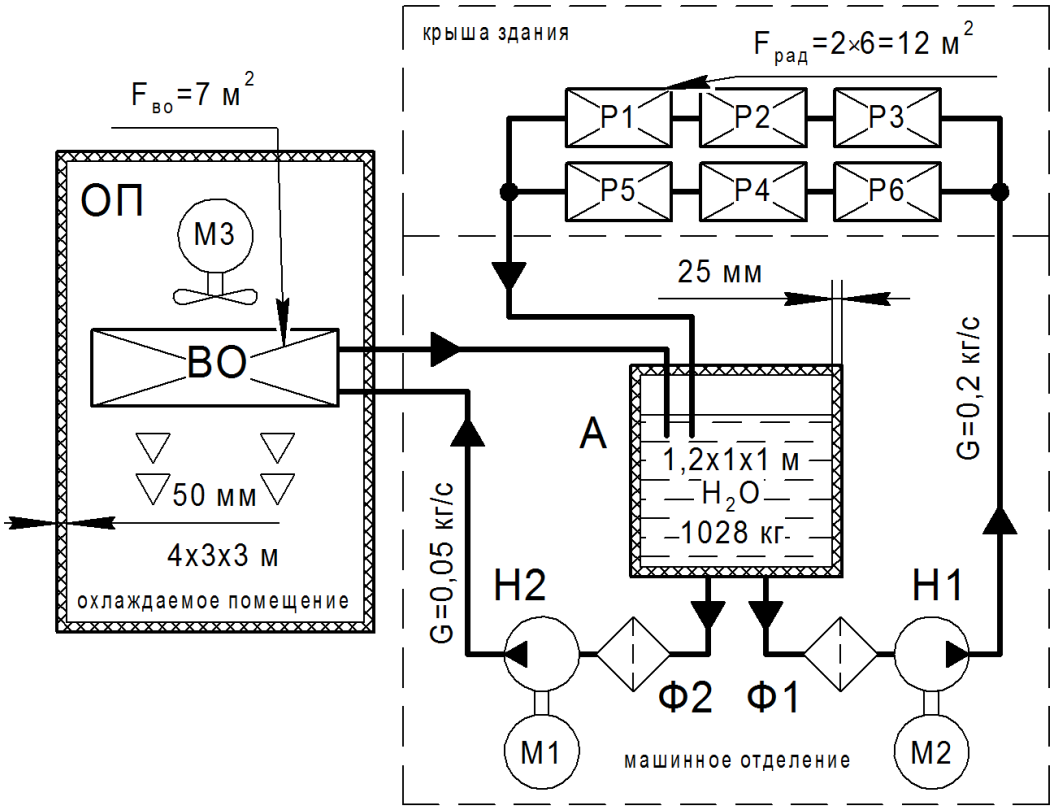


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема моделируемой установки РО: А – аккумулятор холода; ВО – воздухоохладитель; Н1, Н2 – насосы; М1, М2, М3 – электродвигатели, ОП – охлаждаемое помещение; Р1…Р6 – радиаторы; Ф1, Ф2 – фильтры

Результаты моделирования работы установки РО представлены на рис. 2.

Температура теплоносителя в аккумуляторе холода (кривая 3 на рис. 2а) за счет работы радиаторов понижается от +20°С в 0:00 до +14,6°С к 6:00 утра.

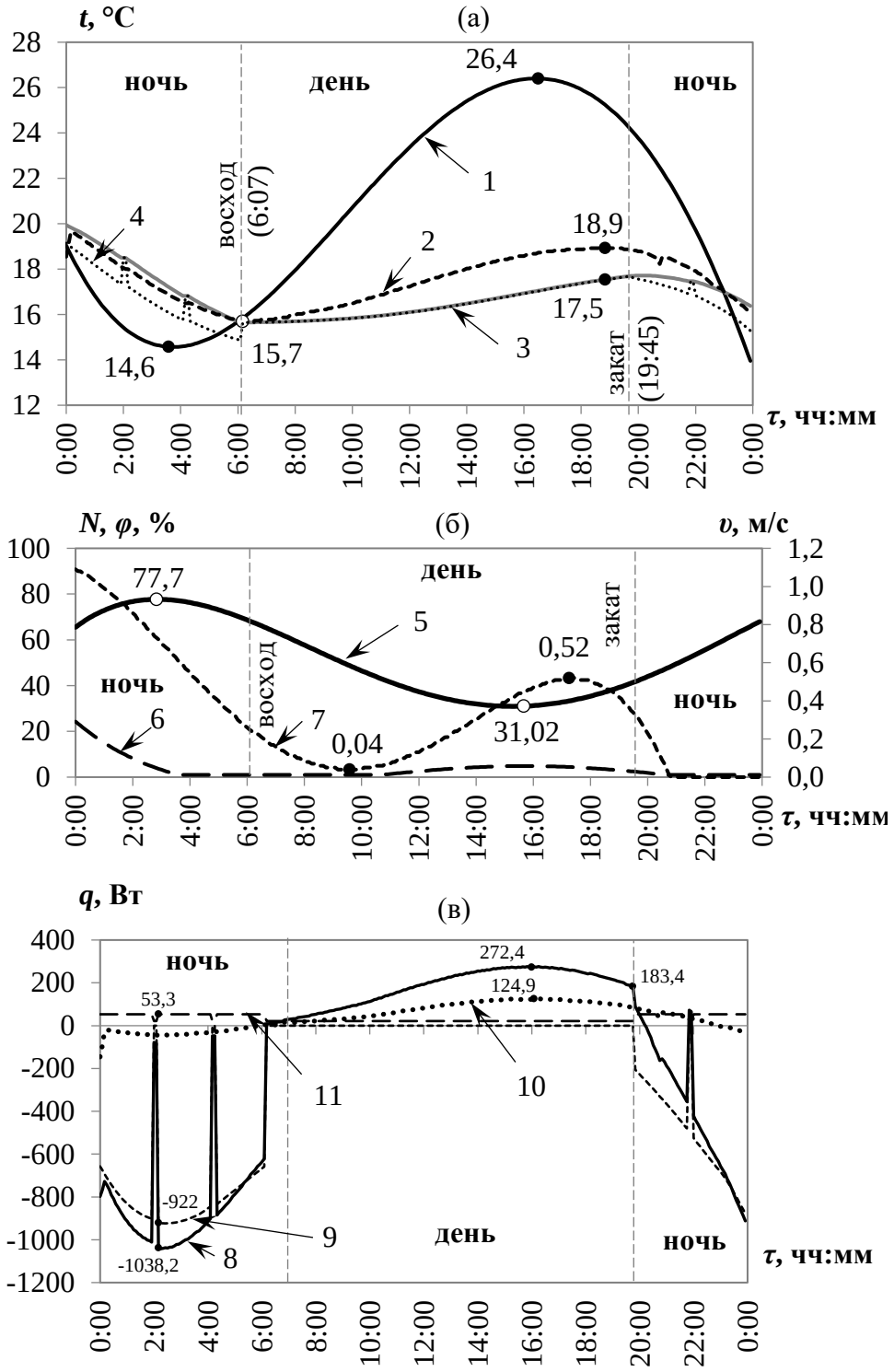


Рис. 2. Динамика изменения рабочих параметров установки РО за 23 августа 2018 года:
а – температуры в системе; б – параметры атмосферного воздуха;
в – тепловые потоки в системе; 1 – температура атмосферного воздуха; 2 – температура воздуха в охлаждаемом помещении; 3 – температура теплоносителя в аккумуляторе холода;
4 – температура теплоносителя на выходе из радиаторов; 5 – относительная влажность атмосферного воздуха; 6 – общий уровень облачности; 7 – скорость ветра; 8 – тепловой баланс установки РО; 9 – тепловая мощность, передаваемая от теплоносителя в радиаторах;
10 – холодопроизводительность воздухоохладителя; 11 – суммарная мощность, потребляемая электродвигателями установки

Температура воздуха в охлаждаемом помещении (кривая 2) понижается до момента восхода Солнца в 6:07 и достигает +15,7°С. Далее температура воздуха в охлаждаемом помещении поднимается и достигает +18,9°С к 18:30. При этом температура атмосферного воздуха днем поднимается до +26,4°С к 16:00 (кривая 1). Средняя температура в охлаждаемом помещении за сутки составляет +17,5°С, что на 3 К ниже среднесуточной температуры атмосферного воздуха (+20,5°С).

Температура теплоносителя в аккумуляторе холода в дневное время на 1…1,4 К ниже температуры охлаждаемого воздуха. При прохождении через радиатор в ночное время теплоноситель охлаждается на 1,4 К (кривая 4).

В дневное время температура поверхности воздухоохладителя была выше температуры точки росы атмосферного воздуха. Следовательно, осушения воздуха при его охлаждении не происходило, и в помещении должен был наблюдаться высокий уровень влажности воздуха (>55%).

В ночное время к 2:00 радиаторы сбрасывают до 922 Вт тепла или 76,8 Вт на 1 м^2 излучающей поверхности (кривая 9 на рис. 2в). При этом одновременно происходит сброс тепла через стенки трубопроводов и аккумулятора холода. Из-за этого общие потери тепла (кривая 8) в установке достигают 1038 Вт. В среднем же в ночное время радиаторы сбрасывают 665 Вт тепла или 55 Вт на 1 м^2 излучающей поверхности.

Днем к 16:00 холодопроизводительность воздухоохладителя составляет 125 Вт. При этом холодопроизводительность воздухоохладителя равна теплопритоку через ограждения. Столь малый теплоприток в охлаждаемое помещение объясняется низкой скоростью движения воздуха, как у наружной (кривая 7 на рис. 2б), так и у внутренней поверхности ограждающей конструкции.

При одновременном включении два насоса и вентилятор воздухоохладителя установки потребляют до 53,3 Вт электрической мощности. В дневное время насос второго контура и вентилятор воздухоохладителя потребляют совместно 21,6 Вт. За сутки установка потребила 0,832 кВт·ч электроэнергии.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что установка радиационного охлаждения в указанных условиях могла свободно поддерживать комфортную температуру воздуха в помещении. Установка не способна производить осушение воздуха, в связи с чем уровень относительной влажности будет высоким, и в некоторых случаях может оказаться выше допустимого значения (>60%). В дальнейших исследованиях при помощи разработанной модели предполагается провести моделирование работы установки РО в течение годового цикла. Также разработанная модель может использоваться для оптимизации конструкции установок РО.

Работа выполнена в рамках проекта 0118РК00535 на основе гранта AP05130918/ГФ, выделенного Министерством образования и науки Республики Казахстан.

Литература

1. Vall S., Castell A. Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 77. – P. 803–820.
2. Zhao B., Hu M., Ao X., Chen N., Pei G. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects // Applied Energy. – 2019. – Vol. 236. – P. 489–513.
3. Aili A., Zhao D., Lu J., Zhai Y., Yin X., Tan G., Yang R.. A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling // Energy Conversion and Management. – 2019. Vol. 186. – P. 586–596.

4. Tsoy A.P., Alimkeshova A.K., Granovskiy A.S. Cooling process modeling of a periodically incoming liquid, using night radiation cooling // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2007.
5. Карагусов В.И., Гошля Р.Ю., Сердюк В.С., Колпаков И.С., Немыкин В.А., Погуляев И.Н. Экспериментальный стенд для исследования радиационных систем жизнеобеспечения: первые эксперименты // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 8-й международной научно-технической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 159–160.
6. Цой А.П., Грановский А.С., Джамашева Р.А., Ашихин А.Ю., Корецкий Д.А. Экспериментальное исследование системы ночного радиационного охлаждения в летний период времени // Вестник Алматинского технологического университета. – 2018. – № 3 (120). – С. 110–117.
7. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины: учебник. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
8. Samuel D.G.L., Nagendra S.M.S., Maiya M.P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review // Building and Environment. – 2013. – Vol. 66. – P. 54–64.

УДК536.75:621.565

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.С. Талызин, А.С. Кочетов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

talyzin@bmstu.ru

Аннотация

В данной работе рассматривается применение энтропийно-статистического метода анализа на этапе проектирования систем холодоснабжения с целью увеличения эффективности.

Приведено описание выбора системы холодоснабжения для модернизации существующего предприятия пищевой промышленности с тремя рабочими температурными уровнями (температуры кипения -10°С, -18°С, -32°С).

Целью модернизации было увеличение эффективности оборудования и применение хладагента, отвечающего требованиям по охране окружающей среды.

Рассчитаны потери работы сжатия для компенсации производства энтропии по элементам рассматриваемых систем. Рассчитаны значения действительного холодильного коэффициента и степени термодинамического совершенства.

В качестве основного инструмента для расчета и анализа применяется метод энтропийно-статистического анализа (ЭСМА).

Ключевые слова

Энтропийно – статистический метод термодинамического анализа, эффективность, системы холодоснабжения предприятий пищевой промышленности.

Для определения мероприятий по увеличению эффективности работы холодильных установок важно применение корректного инструмента анализа. Таким инструментом является энтропийно-статистический метод термодинамического анализа, позволяющий определить затраты электроэнергии для компенсации производства энтропии вследствие необратимости и неравновесности реальных процессов по компонентам системы с целью определения элемента или процесса требующего увеличения эффективности [1, 5].

Задачами модернизации системы холодоснабжения предприятия пищевой промышленности являлись увеличение эффективности относительно применяемой системы и замена используемого хладагента альтернативным, обладающим меньшим значением потенциала глобального потепления (ПГП) [2, 3, 4].

Рассматриваемое предприятие пищевой промышленности расположено в г. Москва представляет собой магазин с тремя рабочими температурными уровнями:

1. Температура кипения -10°С, холодопроизводительность 264,4 кВт;
2. Температура кипения -18°С, холодопроизводительность 15,7 кВт;
3. Температура кипения -32°С, холодопроизводительность 55,9 кВт;

В качестве рабочего цикла применялся цикл одноступенчатого сжатия с однократным дросселированием, одна холодильная установка для температуры кипения -10°С и одна холодильная установка для температур кипения -18°С, -32°С. В качестве хладагента применялся R404A.

Для анализа использовались следующие основные зависимости:

- удельная массовая холодопроизводительность

$$q_o^{общ} = \sum_{i=1}^{3} \left(q_{oi} \times g_i \right), \quad (1)$$

где q_{oi} – удельная массовая холодопроизводительность на i температурном уровне;

g_i – удельный массовый расход на i температурном уровне.

Удельный массовый расход на i температурном уровне определяется как отношение массового расхода G_i [кг/с] на i температурном уровне к массовому расходу $G_н$ [кг/с] самого низкого температурного уровня.

$$g_i = \frac{G_i}{G_н}, \quad (2)$$

- минимальная необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода:

$$l_{min}^{общ} = \sum_{i=1}^{3} \left(l_{min_i} \times g_i \right), \quad (3)$$

где l_{min_i} – минимальная необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода на i температурном уровне;

- адиабатная работа сжатия:

$$l_{ад}^{общ} = \sum_{i=1}^{3} \left(l_{ад_i} \times g_i \right), \quad (4)$$

где $l_{ад_i}$ – адиабатная работа сжатия на i температурном уровне;

- действительная затрачиваемая удельная работа сжатия:

$$l_{сж}^{общ} = \sum_{i=1}^{3} \left(l_{сж_i} \times g_i \right), \quad (5)$$

где $l_{сж_i}$ – действительная затрачиваемая удельная работа сжатия на i температурном уровне;

- степень термодинамического совершенства

$$\eta_{терм}^{общ} = \frac{l_{min}^{общ}}{l_{сж}^{общ}}, \quad (6)$$

- холодильный коэффициент при адиабатном процессе сжатия:

$$\varepsilon_{ад}^{общ} = \frac{q_o^{общ}}{l_{ад}^{общ}}, \quad (7)$$

- действительное значение холодильного коэффициента:

$$\varepsilon_{д}^{общ} = \frac{q_o^{общ}}{l_{сж}^{общ}}, \quad (8)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе (при наличие отдельных конденсаторов для каждого рабочего температурного уровня):

$$\Delta l_{кд}^{общ} = \sum_{i=1}^{3}\left(\Delta l_{кд_i} \times g_i\right), \quad (9)$$

где $\Delta l_{кд_i}$ – необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе на i температурном уровне.

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании:

$$\Delta l_{др}^{общ} = \sum_{i=1}^{3}\left(\Delta l_{др_i} \times g_i\right), \quad (10)$$

где $\Delta l_{др_i}$ – необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе на i температурном уровне;

Необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе:

$$\Delta l_{и}^{общ} = \sum_{i=1}^{3}\left(\Delta l_{и_i} \times g_i\right), \quad (11)$$

где $\Delta l_{и_i}$ – необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе на i температурном уровне.

Расчетная величина адиабатной работы сжатия:

$$l_{ад.р}^{общ} = l_{min}^{общ} + \Delta l_{кд}^{общ} + \Delta l_{др}^{общ} + \Delta l_{и}^{общ} + \Delta l_{другие}^{общ}, \quad (12)$$

где $\Delta l_{другие}^{общ}$ – потери в других процессах (перегрев, смешение и т. д.)

Энергетические потери в компрессоре:

$$\Delta l_{км}^{общ} = l_{сж}^{общ} - l_{ад.р}^{общ}, \quad (13)$$

Расчетная работа сжатия:

$$l_{сж.р}^{общ} = l_{ад.р}^{общ} + \Delta l_{км}^{общ}, \quad (14)$$

Результаты расчета потерь по элементам системы в % от действительной затрачиваемой работы сжатия приведены в таб. 1. Результаты расчета показателей эффективности приведены в таб. 2.

Таблица 1

Результаты расчета потерь по элементам системы в % от действительной затрачиваемой работы сжатия

	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4
Компрессор	31,45	30,04	36,41	35,89
Конденсатор	13,98	14,01	13,05	15,29
Дросселирование	24,82	18,77	15,17	14,62
Экономайзер	–	1,98	–	–
Испаритель-конденсатор	–	–	1,15	1,38
Испаритель	6,86	7,97	9,63	8,52

Таблица 2

Показатели эффективности рассматриваемых систем

	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4
$\eta_{терм}^{общ}$	0,23	0,27	0,25	0,25
$\varepsilon_{д}^{общ}$	1,74	1,97	2,49	2,50

При анализе существующей системы холодоснабжения (Система 1) было обнаружено, что вторые по величине затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии приходятся на процессы дросселирования.

Для уменьшения потерь при дросселировании было принято решение использовать отдельные холодильные установки для температур кипения -18°С и -32°С. Также был изменен цикл работы на цикл с экономайзером при использовании хладагента R404A (Система 2). Данные мероприятия позволили снизить потери при дросселировании на 24,38%, увеличить холодильный коэффициент на 11,68% и степень термодинамического совершенства на 14,81% (таб. 2).

Для уменьшения отрицательного влияния на окружающую среду было принято решение об использовании хладагента R744. Наиболее эффективным циклом R744 для аналогичных применений является каскадная холодильная установка с R134a в верхней ветви каскада и R744 в нижней [2]. Для увеличения эффективности данная установка была модернизирована путем применения отдельных компрессоров для температур кипения -18°С и -32°С (Система 3). На рис. 1 показана принципиальная схема Системы 3. Результаты анализа показали снижение затрат работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании на 38,88% и увеличение холодильного коэффициента на 30,12% по сравнению с Системой 2.

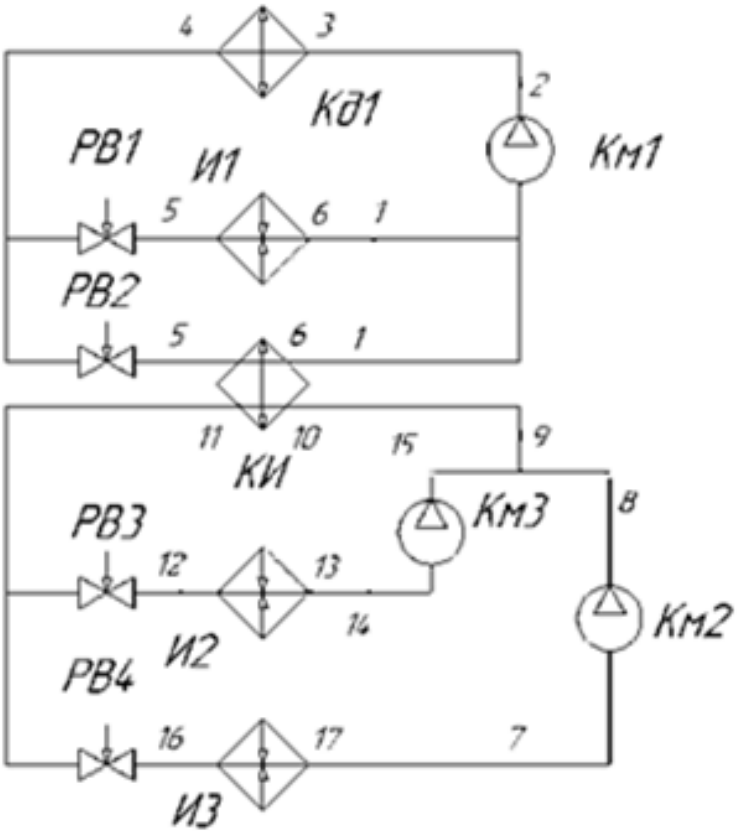


Рис. 1. Принципиальная схема Системы 3. Км1, Км2, Км3 – компрессоры; И1, И2, И3 – испарители; Кд1 – конденсатор, РВ1, РВ2, РВ3, РВ4 – регулирующие вентили; КИ – испаритель-конденсатор

Для снижения ПГП системы холодоснабжения в качестве альтернативы хладагенту R134a был рассмотрен R450A (Система 4). Согласно результатам анализа, показатели эффективности каскадной холодильной установки с R450A в верхней ветви каскада находятся на сопоставимом уровне с Системой 4, а потенциал глобального потепления хладагента R450A ниже R134a (601 против 1300).

Результаты анализа потерь приведены на рис. 2.

Выводы:

1. Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа позволяет определить потери в элементах системы и предпринять мероприятия по увеличению эффективности работы на этапе проектирования;

2. Для увеличения эффективности холодильных систем следует уменьшать затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании, например, применяя цикл с экономайзером, каскадный цикл, альтернативный хладагент;

3. Холодильный коэффициент каскадной холодильной системы с отдельными компрессорами для температур кипения -18°C и -32°C выше холодильной системы, работающей по циклу одноступенчатого сжатия с однократным дросселированием и двумя холодильными установками (одна установка для температуры кипения -18°C, одна для температур кипения -18°C и -32°C) на 30,4%, степень термодинамического совершенства выше на 8%;

4. Хладагент R450A является полноценной заменой хладагента R134a в верхней ветви каскада за счет сопоставимых показателей эффективности (холодильный коэффициент и степень термодинамического совершенства) и меньшего значения потенциала глобального потепления.

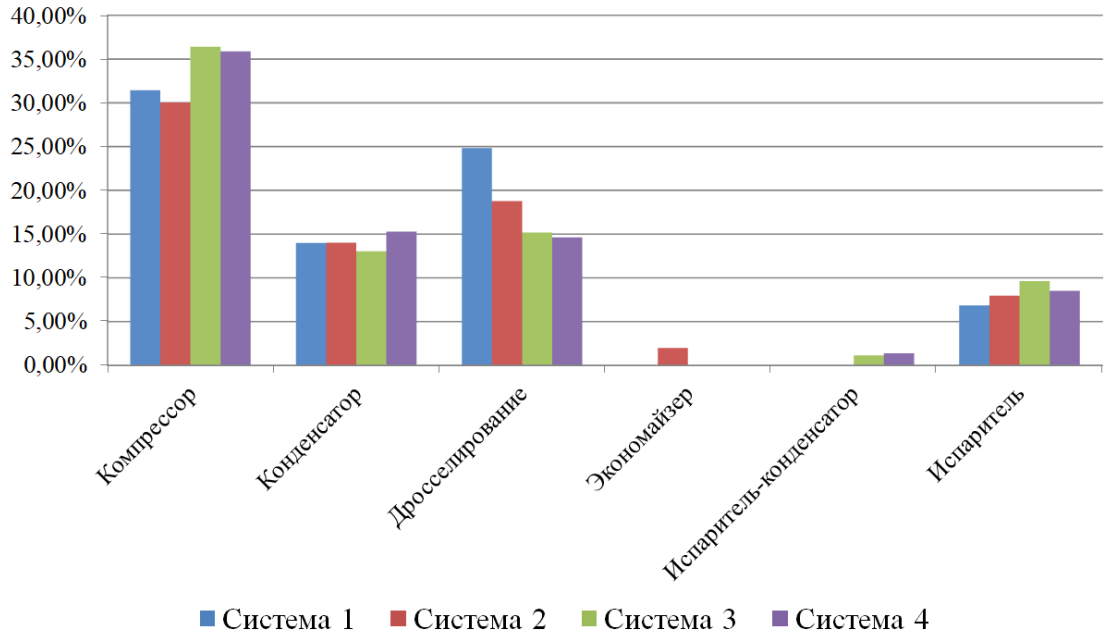


Рис. 2. Сравнение энергетических потерь по компонентам систем
в % от действительной затрачиваемой работы сжатия

Литература

1. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 507 с.
2. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Сравнение с помощью энтропийно-статистического анализа транскритических циклов на CO2 с циклами на традиционных хладагентах для систем холодоснабжения предприятий торговли // Холодильная техника. – 2017. – № 2. – С. 34-41.
3. Shishov V.V., Talyzin M.S., Entropic and statistical analysis of CO2 refrigeration plants for retail application // Refrigeration Science and Technology. – 2019. – Vol. 2019-April. – С. 295-302.
4. Шишов В.В., Талызин М.С. Эффективность работы холодильного оборудования с учетом годового изменения температур окружающей среды // Холодильная техника. – 2019. – № 2. – С. 28-31.
5. Gareeva D.T., Lavrov N.A., Entropy production and exergy loss during mixing of gases. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – 51(11-12). – С. 759-764.

НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЙ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

УДК 620.178.162

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ

Н.М. Березин, А.К. Андреев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация
Рассмотрена взаимосвязь между твердостью и сопротивлением абразивному износу. Для проведения испытаний использовали абразив с различным размером частиц. Показано, что между твердостью и сопротивлением абразивному износу не существует линейной зависимости. что в условиях мало абразивных пород достаточно иметь средние значения твердости порядка 47- 50 HRC, а при работе в высоко абразивных породах необходимо стремиться к получению высоких значений твердости около 50-55 HRC.

Ключевые слова
Абразивный износ, оксид кремния, твердость.

Активное освоение северных территорий требует применения материалов, обеспечивающих комплекс физико-механических свойств. С учетом широкого применения горнодобывающей техники необходимо использование материалов с высокой работоспособностью на различных грунтах и в широком температурном интервале эксплуатации оборудования.

В ходе анализа отказов зубьев ковшей экскаваторов установлено, что основными причинами этого являются абразивный износ и хрупкое разрушение.

Механизм и интенсивность абразивного изнашивания, зависит от минералогического состава природного минерала и его механических свойств – в первую очередь от его твердости. Основные особенности процессов абразивного износа рассматриваются в работах [1 – 7].

Физико-механические свойства абразивов зависят от многих факторов структуры, однородности, наличия дефектов, раздробленного или монолитного состояния.

Горные породы практически не имеют пластичности и остаточной деформации. На практике принято рассматривать агрегатную твердость и твердость минералов, входящих в состав этих пород. Следует отметить, что при одинаковой агрегатной твердости различных горных пород твердость минералов входящих в их состав может резко различаться.

В работе проводили исследования опытных сталей на специально разработанной установке.

Проведенные абразивные испытания сталей позволили установить степень ее износостойкости от поверхностной твердости образцов. На рис. 1 приведены

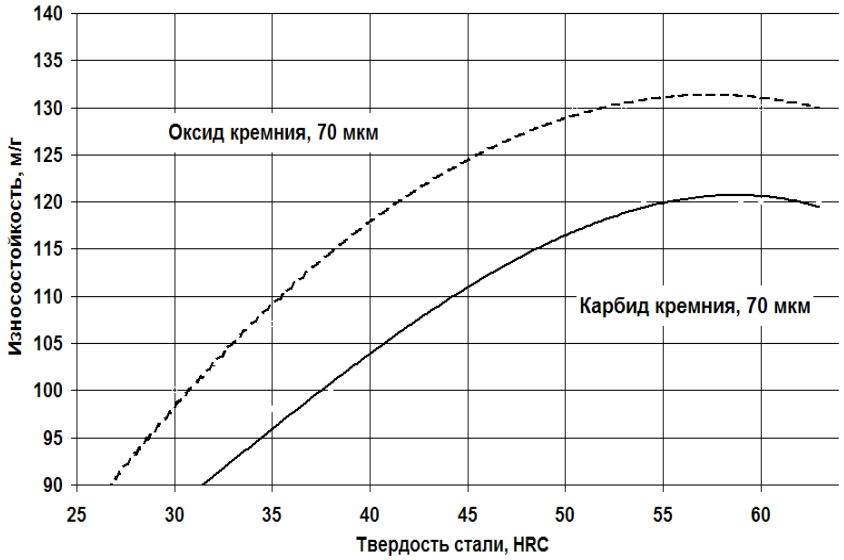
зависимости абразивного износа (**Z)** стали различной твердости от размеров и размера абразивных частиц.

Проведенные испытания показали, что на начальном этапе увеличение твердости металла приводит к резкому росту износостойкости (см. рис. 1).

Дальнейшее увеличение твердости приводит к замедлению роста износостойкости, и даже некоторый спад, что связано с охрупчиванием материала и его выкрашиванием.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности образцов после проведения испытаний на абразивный износ. Как показали фрактографические исследования, снижение роста износостойкости при повышении значений твердости может быть связано с уменьшением глубины внедрения абразива в поверхность металла. Это приводит к переходу от микрорезания (см. рис. 2, а) к пластическому оттеснению (см. рис. 2, б) и последующему выкрашиванию (см. рис. 2, в).

а)



б)

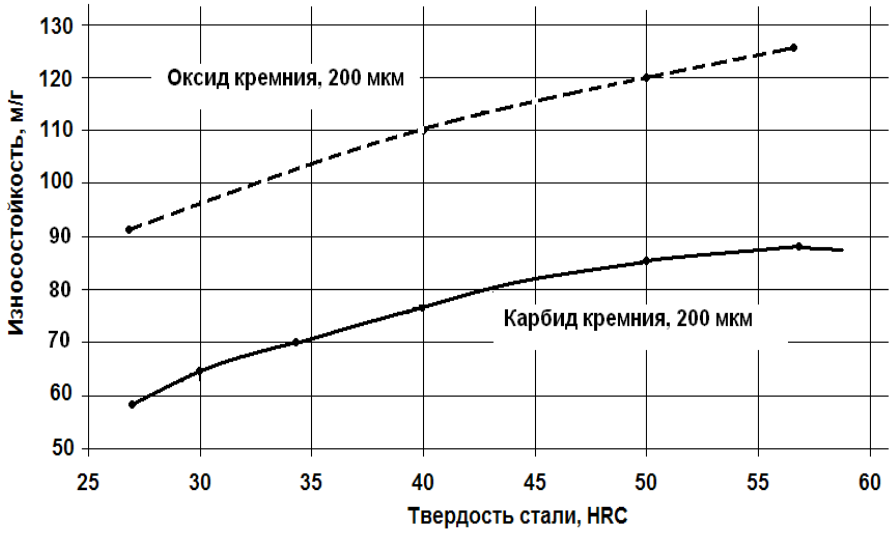
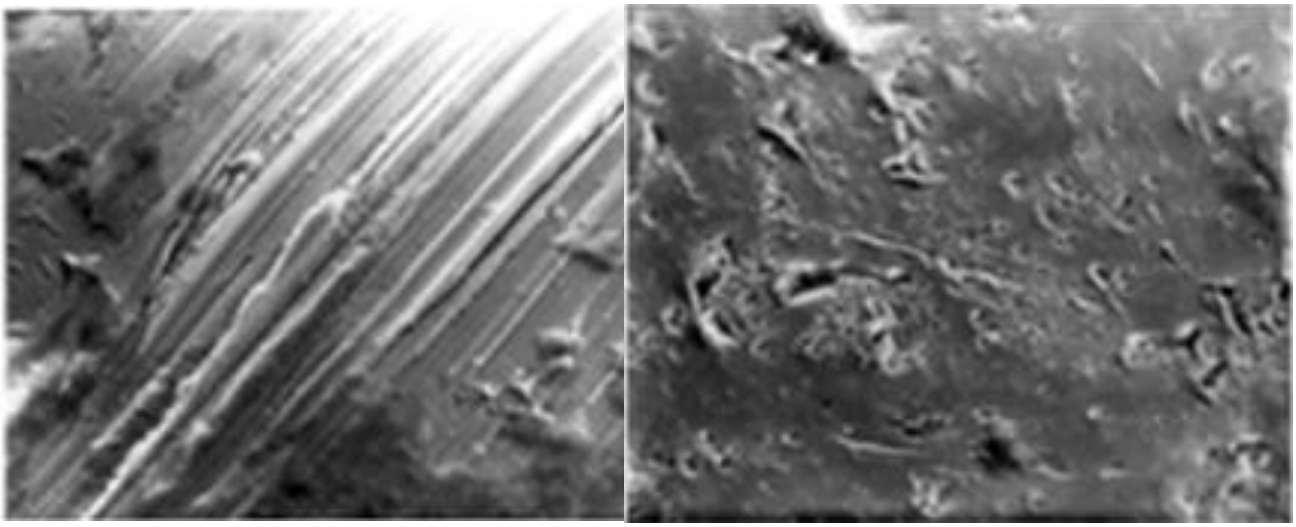


Рис. 1. Влияние твердости стали на абразивную износостойкость в зависимости от размера частиц SiO_2: а –70 мкм, б – 200 мкм



а) б)

в)

Рис. 2. Фрактограммы поверхности износа образцов разной твердости, х200: а – микрорезание и пластическое оттеснение, твердость 35 HRC; б – пластическое оттеснение, твердость 48 HRC; в – выкрашивание поверхности, твердость 57 HRC

Таким образом, анализ испытаний показал, что в условиях мало абразивных пород достаточно иметь средние значения твердости порядка 47- 50 HRC, а при работе в высоко абразивных породах необходимо стремиться к получению высоких значений твердости около 50-55 HRC.

Литература

1. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1998. 480 с.
2. Wellinger K., Uetz H. Verschliss durch körnige und mineralische Stoffe unter Berücksichtigung des Mahlverschleißes in Kugelmühlen // Zement -Kalk -Gips, Bd. 18, Nr. 2, 1995. –S. 3-14.
3. Сафронов Б.П. Научно-методические основы синтеза трибосистемы применительно к изнашиванию сталей абразивом. (МИИТ). М. 1991. 50 с.
4. Виноградов В.Н., Сорокин., Доценко В.А. Абразивные изнашивания бурильного инструмента. – М.: Наука, 1995. 206 с.
5. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. М.: Наука, 1999. – 247 с.
6. Сердитов А.Е., Лебедев В.В. Исследование износостойкости литых сталей на различных горных породах //Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов: Сб. тр.X междунар. науч.-тех. конф. СПбГУНиПТЮ 2004. С. 97-102.
7. Wellinger K., Uetz H. Verschliss durch Wirkung von körnigen mineralischen Stoffen. Sonderdruck aus "Materialprüfung", Bd. 9, Nr. 5, 2007. – S. 25-34.

УДК 620.18

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Б.С. Ермаков, А.Р. Хасанов, Е.О. Хасанова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

hasanoffalick@yandex.ru

Аннотация
Работа посвящена исследованию микроструктуры сварных соединений материалов трубопроводного транспорта. Показано, что величина ударной вязкости и трещиностойкости линий сплавления обеих сталей напрямую зависит от технологических параметров сварки.

Ключевые слова
Трубные стали, зона термического влияния, линия сплавления, ударная вязкость, трещиностойкость.

Развитие трубопроводного транспорта в РФ связана со строительством крупных российских, межконтинентальных и транснациональных трубопроводных систем. В ходе совершенствования методов строительства газо- и нефтепроводов выдвигаются все более высокие требования к материалам для изготовления труб [1, 2].

Увеличение диаметров и давления, толщин стенок труб, усовершенствование сварочных технологий вызывают ужесточения не только в требованиях к механическим показателям, химическому составу сталей, но также и к технологии изготовления листового проката, процессам формовки труб, а также физическим средствам контроля качества продукции.

Микроструктура в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения трубных сталей от линии сплавления сварного шва до основного металла изменяется непрерывно и определяется скоростью охлаждения, химическим составом и прокаливаемостью стали, размером зерна и степенью гомогенизации аустенита по содержанию углерода, легирующих и микролегирующих элементов перед превращением [3, 4]. Основные структурные изменения происходят в следующих зонах ЗТВ:

- участке крупного зерна, непосредственно примыкающего к линии сплавления,
- на участках полной и частичной перекристаллизации;
- на участке, нагреваемом вблизи АС1.

Скорость нагрева и охлаждения при сварке зависит от ряда факторов: толщины металла, величины сварочного тока при сохранении скорости сварки, температуры металла свариваемого изделия, числа проходов при сварке, погонной энергии сварки. Каждый из перечисленных выше факторов и их совокупность могут существенно повлиять на характеристики структурных состояний в каждой из четырех выделенных зон в стали различного легирования.

Структура низколегированной трубной стали не является устойчивой к высокотемпературным сварочным воздействиям, поэтому в ходе сварки в зоне термического воздействия сварного шва формируется ряд структур с различными физико-механическими свойствами.

В ходе охлаждения после сварки в результате $\gamma \Rightarrow \alpha$ превращения в

низкоуглеродистой низколегированной трубной стали изменение структуры начинается с выделения свободного феррита, и у границы сплавления формируется неблагоприятная структура крупнозернистого игольчатого феррита, обладающая низкими значениями работы удара.

Наиболее неблагоприятными зонами при сварке феррито-перлитных трубных сталей являются граница сплавления и зона разупрочнения на участке полной перекристаллизации ЗТВ, обусловленная формированием значительной доли крупного полигонального феррита из-за снижения скорости охлаждения, связанной с высоким уровнем тепловложений при высокопроизводительной многодуговой сварке.

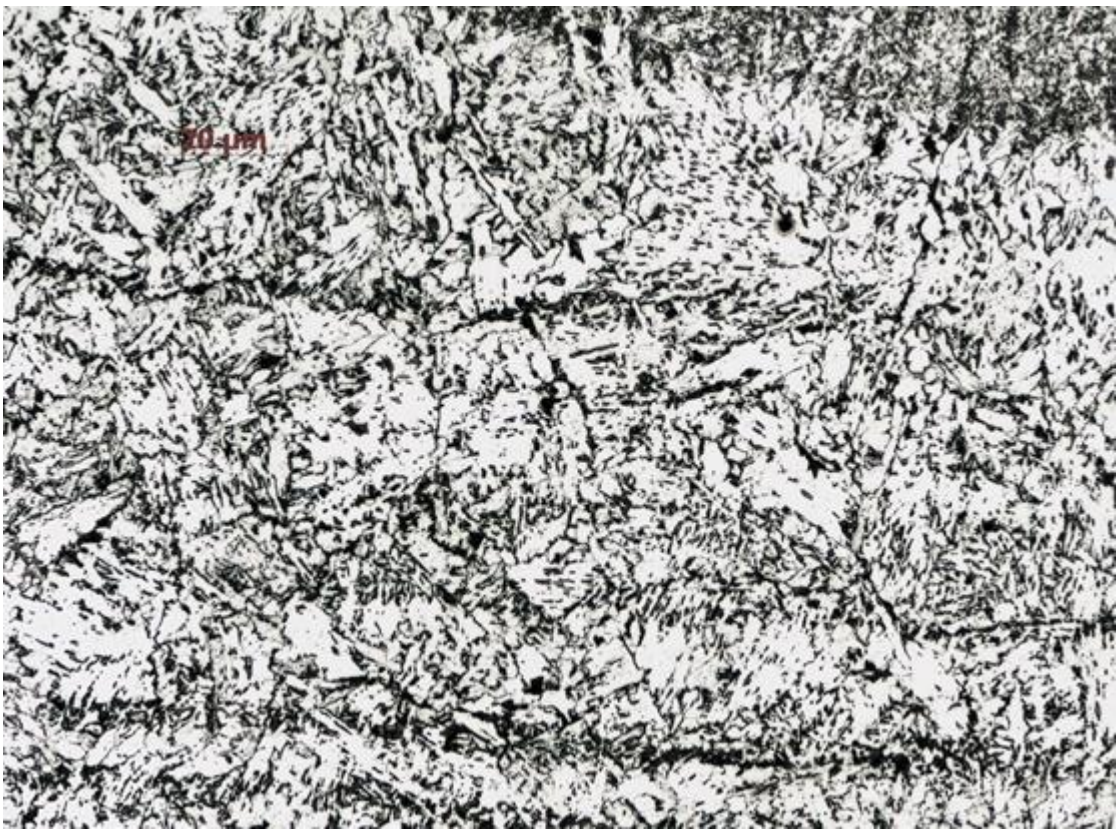
На участках частичной перекристаллизации (поскольку структура основного металла содержит помимо феррита и цементит) при нагреве в области $\alpha+\gamma$ сначала происходит зарождение аустенита в виде отдельных участков преимущественно по границам зерен, а затем их рост. При последующем охлаждении образовавшийся аустенит полностью или частично превращается в феррито-карбидную (феррито-перлитную) смесь. Участки полной и частичной перекристаллизации, сформировавшиеся при более низкой температуре по сравнению с участками ЗТВ, расположенными ближе к границе сплавления, обладают наибольшей вязкостью.

В этой связи, для получения удовлетворительных вязких свойств металла труб, особенно в области отрицательных температур, необходимо ограничение погонной энергии сварки. Это ограничение вызвано тем, что с увеличением погонной энергии общая протяженность ЗТВ увеличивается, а размеры вновь образующихся в процессе перекристаллизации фаз и структурных составляющих возрастают.

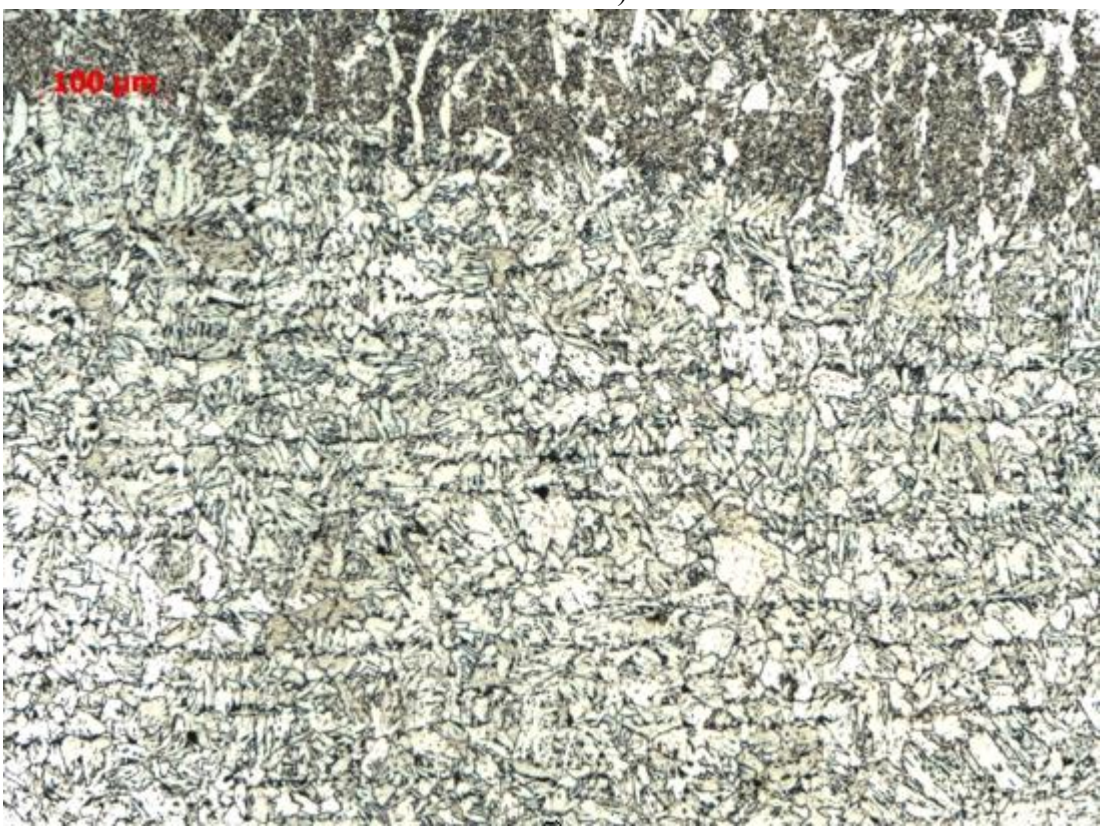
В работе проведено исследование металла продольных сварных соединений труб для нефтепроводов, направленное оценку микроструктуры и ее влияния на комплекс свойств материала. Представленные на рис.1 микроструктуры представляют собой типичные структуры Видманштетта с разной степенью выраженности и размеров игольчатого феррита, что, в первую очередь, зависит от скорости охлаждения зоны термического влияния сварного шва. Известно, что по мере повышения скорости охлаждения (при постоянном содержании углерода в сталях) форма ферритных зерен постепенно меняется от полигональных к игольчатым.

Как указано в работе [5], при охлаждении в зонах термического влияния обеих сталей (на участках перегрева, примыкающих к границе сплавления) ферритные иглы растут из границ к центру аустенитных зерен и имеют четко выраженную ориентацию: плоскости додекаэдра ферритной пластины (110) и расположены параллельно плоскостям октаэдра аустенитного зерна (111), а плотноупакованные направления (111) объемноцентрированной кубической структуры феррита параллельны плотноупакованным направлениям (110) гранецентрированной кубической решетки аустенита. Такое взаимное расположение двух фаз в процессе перекристаллизации обеспечивает наилучшее сопряжение между двумя структурами и наименьшую поверхностную энергию. На рисунке приведены типичные структуры игольчатого феррита, сформировавшегося по приведенному выше механизму – с четким ориентированием игл по заданным кристаллографическим направлениям, пространство между иглами заполнено феррито- цементитными агрегатами перлитного происхождения.

В ходе анализа микроструктур была исследована вероятность сохранения некоторого количества остаточного аустенита в Видманштеттовых структурах линий сплавления сталей, так как известно, что в случае частичного образования бейнита в межигольчатом пространстве в структурах сталей должен сохраниться остаточный аустенит. Однако проведенные исследования не выявили следов бейнита и остаточного аустенита в структурах обеих сталей.



а)



б)

Рис. 1. Сварной шов, линия сплавления и область перегрева в зоне термического влияния сварного шва: а – труба 1; в – труба 2

Высокая скорость охлаждения шва в стали трубы № 1 приводит к формированию грубой игольчатой структуры (см. рис. 1, а), усредненно оцениваемой

4-5 баллом по шкале 4 ряд А ГОСТ 5640; в то время, как в стали трубы № 2 благодаря более благоприятным условиям формирования сварного соединения балл структуры Видманштетта (см. рис. 1, б) находится в пределах 2-3 балла по шкале 4 ряд А ГОСТ 5640.

На основании исследований микроструктуры зон, примыкающих к границе сплавления сварных швов в сталях (линий сплавления), можно заключить, что величина ударной вязкости и трещиностойкости линий сплавления обеих сталей напрямую зависит от технологических параметров сварки, повышение погонной энергии сварки приводит к росту аустенитного зерна в линии сплавления сварного шва, а при ускоренном охлаждении – к образованию грубоигольчатых ферритных структур, обладающих повышенной хрупкостью, особенно в зоне отрицательных температур. Численные значения ударной вязкости и трещиностойкости сталей являются функцией размеров и формы игл ферритного зерна, так в стали трубы № 2, обладающей наилучшими сочетаниями ударной вязкости и трещиностойкости – Видманштеттва структура линии сплавления соответствует 2-3 баллу по шкале 4 ряд А ГОСТ 5640; в случае стали трубы № 1 с наихудшими показателями ударной вязкости и трещиностойкости – как 4-5 балл структуры Видманштетта.

Литература

1. Подольский Ю.В. Возможное развитие нефтегазового комплекса России до 2030 года.// Нефтегазовая геология. Теория и практика. №4/ 2008(3), с. 84-96.
2. Кожухова О.С. Нефтегазовый комплекс России: состояние и направления развития.// Вопросы экономики и права. №7/ 2011, с. 174-177.
3. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С. и др. Металлы и сплавы. Справочник. Под общей редакцией Ю.П. Солнцева. – СПб. Профессионал, 2005. – 998 с.
4. Кохрейн Р.К., Моррисон У.Б. Влияние технологии производства на характеристики превращения и микроструктуру некоторых трубных ниобиймолибденванадиевых сталей.// Стали для газопроводных труб и фитингов. Труды конференции. Под ред. Рудченко. М.: Металлургия, 1985. – 480 с.
5. Лякишев Н.П., Шамрай В.Ф., Эгиз И.В. Текстура и кристаллографические особенности разрушения материала труб из стали Х70 // Металлы. 2000. № 2. С. 68–72.

УДК 672.31

ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ

А.А. Перегудов, С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

mikki435@gmail.com, vologjanina@corp.ifmo.ru

Аннотация
Приведен обзор основных критериев прочности элементов конструкций с трещинами. Сделаны выводы относительно выбора определенного критерия прочности в зависимости от условий эксплуатации и степени ответственности конструкции.

Ключевые слова
Сопротивление разрушению, распространение трещины, критерии прочности, энергетический критерий, силовой критерий

Влияние трещин на прочность элементов конструкций является актуальным вопросом, так как в настоящее время зафиксировано большое количество случаев внезапного разрушения деталей, причем разрушение имело место при напряжениях ниже предела текучести материала. Гарантировать полное отсутствие трещин в конструкциях невозможно, несмотря на контроль на всех стадиях изготовления.

Причины появления трещин могут быть самыми разнообразными: дефекты кристаллической решетки, технологическое происхождение, усталость и т.д.

Так как велика вероятность присутствия трещин в изделиях, надежность работы изделия может быть решена двумя путями: либо выбором материала, который будет «держать» трещины,- таким, в котором трещины не будут распространяться при эксплуатационных нагрузках, либо определением уровня и характера нагружения.

Решение этой задачи требует разработки подходов к оценке сопротивления материалов распространению трещин и определения их критических размеров. Мерой сопротивления материала распространению трещины может служить затрачиваемая на это работа. Если dA = работа, затрачиваемая на образование свободной поверхности площадью dF, то dA/ dF = G_c – удельная работа. Чем больше эта работа, тем лучше материал детали сопротивляется распространению трещин.

При хрупком разрушении металлов указанная работа составляет 0,1 – 1,0 Дж/см^2. При пластическом разрушении $G_c \geq 15$ Дж/см^2. В этом случае работа расходуется на пластическую деформацию у основания трещины. Интервал 1,0 – 15 Дж/см^2 характеризует переходное состояние, часто связанное с квазихрупким разрушением.

Особую опасность распространение трещин представляет в тех случаях, когда оно совершается как бы самопроизвольно, без дополнительной внешней нагрузки. Такой характер распространения трещин называется нестабильным.

При проведении исследований рассматривались критерии прочности элементов конструкций с трещинами.

Энергетический критерий

При разработке критериев прочности наибольшее внимание уделялось хрупким разрушениям, которые наиболее опасны.

Одна из первых попыток получить такой критерий принадлежит А.А. Гриффитсу [1], рассмотревшему вопрос о прочности пластины неограниченных размеров и хрупкого материала, содержащей трещину эллиптической формы.

Рассмотрение балансов расхода и прихода энергии при появлении трещины в растянутой и закрепленной пластине позволило Гриффитсу получить выражение для критического напряжения $\sigma_{кр}$, выше которого начинается нестабильное распространение трещины.

В решении Гриффитса материал рассматривался как идеально хрупкий, поэтому работа распространения трещины приравнивалась к поверхностной энергии. В реальных металлических материалах при распространении трещин протекает пластическая деформация, которая намного увеличивает работу распространения трещин, или, как принято говорить, вязкость разрушения.

В связи с этим Е. Орован [2] предложил унифицировать выражение для $\sigma_{кр}$. По Оровану формула критического напряжения имеет вид:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2\,EG_c}{\pi\, l}}\,, \tag{1}$$

где, l – длина трещины. Формула (1) может быть использована для определения критической длины трещины $l_{кр}$, при которой наступает нестабильное ее распространение,

$$l_{кр} = \frac{2\,EG_c}{\sigma_{кр}^2\,\pi}\,, \tag{2}$$

Силовой критерий

Идея создания силового критерия заключается в определении напряжения в критический момент нагружения, когда начинается нестабильное разрушение за счет запаса упругой энергии [3-6].

Выражения для напряжений в окрестности тупикового конца трещины были получены на основании работ при рассмотрении пластины из упругого материала бесконечной ширины со сквозной трещиной, подвергнутую однородному растяжению. В случае плоской деформации при трехосном напряженном состоянии напряжение на продолжении трещины будет равно:

$$\sigma_r = \text{К}_I\sqrt{2\pi r}, \tag{3}$$

где: К_I – коэффициент интенсивности напряжений, а r – расстояние от вершины трещины до рассматриваемой точки на продолжении трещины.

Напряжение σ_r, определенное в критический момент нагружения (т.е. при разрушении), могло бы играть роль силового критерия. Однако исследования показали, что при изменении размеров трещины константой является не σ_r, а коэффициент интенсивности напряжений, экспериментально определенный в критический момент нагружения и являющийся поэтому характеристикой прочности материала, в случае, когда элемент конструкции имеет трещины. Этот коэффициент обозначается через К_{Ic}.

Выражение (3) было получено из условия разрушения при отрывном смещении берегов трещины. Кроме рассмотренного случая смещения могут реализовываться также поперечный сдвиг, при котором поверхности трещины скользят одна по другой в направлении, перпендикулярном к переднему краю трещины и продольный сдвиг, при котором поверхности трещины скользят друг по другу параллельно переднему краю

трещины. Для поперечного и продольного сдвигов коэффициент интенсивности напряжений обозначается соответственно $К_{IIс}$ и $К_{IIIс}$.

Для линейно-упругого материала в настоящее время применяется достаточно строгая теория, описывающая напряженное состояние в вершине трещины и являющаяся хорошим фундаментом для анализа хрупких разрушений. К сожалению, такой теории для описания напряженного и деформированного состояния в вершине трещины с развитой пластической зоной пока нет, поскольку решение этой задачи для материала с упрочнением наталкивается на труднопреодолимые препятствия. Между тем, подавляющее большинство практически важных и опасных разрушений сопровождается неизменным присутствием пластически деформированной области в вершине трещины. Эта пластическая деформация оказывает влияние на форму кончика трещины, приводя к сглаживанию пика напряжений, и на свойства материала, подвергаемого разрушению. При деформации образца с трещиной сначала у конца трещины образуется пластическая зона, протяженность которой растет до некоторого относительно небольшого размера d, после чего в начале этой области, совпадающей с концом трещины, возникает локальный разрыв. Трещина начинает двигаться, а пластическая область перемещается вместе с движущимся концом трещины, не изменяя своих размеров и формы. На расстоянии l > d от конца трещины деформации будут только упругими.

Оценка эффективной поверхностной энергии при разрушении металлов и сравнение ее с истинной поверхностной энергией показывает, что первая может превышать вторую на несколько порядков, определяя тем самым исключительную важность учета роли локальной пластической деформации в вершине трещины.

То, что разрушение образца при определении коэффициентов интенсивности в большинстве случаев является пластичным, служит причиной чувствительности этих коэффициентов к ряду факторов, способствующих переходу стали из пластического состояния в хрупкое. К таким факторам относятся температура испытаний, вид деформации, изменение химического состава и режима термообработки, скорость деформации.

Увеличение скорости приложения нагрузки влияет на величину K_{ID} по-разному в разных материалах (K_{ID} – значение $К_{Ic}$, полученное при динамическом приложении сил). В некоторых хладноломких сталях K_{ID} ниже, чем $К_{Ic}$, т.е. динамический коэффициент оказывается ниже, чем статический. В других сталях, особенно нехладноломких, коэффициент интенсивности напряжений K_{ID} с увеличением скорости нагружения растет. В первом случае понижение K_{ID} – результат хладноломкости, во втором случае увеличение K_{ID} – результат возрастания сопротивления пластической деформации пластического участка. При этом зависимость $\sigma = f(\dot{\varepsilon})$ отражается на величине K_{ID}, так как

$$K_{ID} = \sigma * \sqrt{\pi e} = f(\dot{\varepsilon}) * \sqrt{\pi e}, \quad (4)$$

На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что выбор определенного критерия прочности зависит от условий эксплуатации и степени ответственности конструкции.

Литература

1. Griffith A. A. The theory of rupture. Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech. – Delft, 1924.
2. Orowan E. Fracture and strength of solids. Repts. Progn. Phis., 1948, 49, № 12, p. 185-232.

3. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. - Новосибирск: Наука, 2002. 334 с.
4. Лепихин А.М., Москвичев В.В. Характеристики трещиностойкости сварных соединений - оценка, расчет и статистический анализ // Завод, лаб. – 1991. – № 12. – С. 48-51.
5. Лепихин А.М., Козлов А.Г., Москвичев В.В. Прогнозирование надежности элементов сварных металлических конструкций по критериям механики разрушения // Металлические конструкции для работы в суровых климатических условиях. – Красноярск: Красноярский Промстрой НИИпроект, 1982. – С. 38-52.
6. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. – Новосибирск: Наука, 2002. 334 с.

УДК 620.1:526.48

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ МАТЕРИАЛОВ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

С.А. Цупка, С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Sergey_spb92@mail.ru

Аннотация
Приведены сведения о различных методах оценки склонности материалов к хрупкому разрушению. Показано, что выбор оценки должен производиться с учетом множества факторов, учитывающих, в том числе, условия эксплуатации материала.
Ключевые слова
Сталь, вязкость разрушения, работоспособность материала.

Уже в первых работах по оценке вязкости разрушения различных металлов был поставлен вопрос о возможности существования корреляционной зависимости между этим параметром и другими традиционными механическими испытаниями. Такие попытки проводились по следующим направлениям:

1) Замена определения K_{Ic} измерением более простых стандартных показателей механических свойств;

2) Возможность интерпретации сущности вязкости разрушения с помощью определенных физических моделей механизма распространения трещин.

В работах [1-4] было подтверждено наличие корреляционной связи между величиной исходного аустенитного зерна в перлитной стали с хладноломкостью и вязкостью разрушения. Авторами [2] была сделана попытка установить корреляционную связь между микростроением излома и K_{Ic} высокопрочной стали типа 45Х2Н2М. Выполненный Н.В. Олейником [5] анализ 223 сочетаний K_{Ic} и $\sigma_{0,2}$ для сталей, алюминиевых и титановых сплавов, свидетельствует о невозможности построения универсальной корреляционной зависимости различных сплавов.

В работах [1, 2] также предпринимались попытки построения универсальных корреляционных соотношений между K_{Ic} и $\sigma_{в}$, которые не увенчались успехом.

Корреляция с ударной вязкостью [6] имеет ограниченный, частный характер. Результаты оценки ударной вязкости могут быть полезны при прогнозировании уровня вязкости разрушения. Рядом авторов [1-6] проведен анализ корреляционной связи динамической вязкости разрушения и K_{Ic}. Указывается корреляция между G_{Id} и KC_p в случае низкой вязкости высокоуглеродистых сталей.

По данным исследований, проведенных на армко-железе (0,04%С) и стали 17ГС, показано, что величина критической температуры хрупкости в сильной степени зависит от метода оценки склонности стали к хрупкому разрушению [1, 3, 4]. Это хорошо известный факт, как и то, что критическая температура хрупкости даже при одном и том же методе испытания зависит от геометрии образца и надреза.

При оценке работоспособности материала в наиболее жестких условиях происходит естественное завышение нижней границы его применения. Анализируя литературный данные [1-6], допустимый температурный интервал возможного использования данного материала можно разделить на ряд областей (см. рисунок).

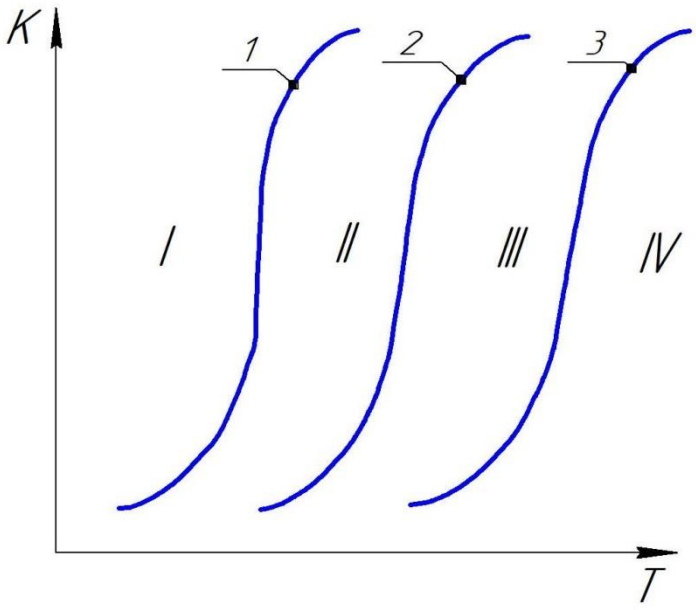


Рисунок. Пороги хладноломкости, определяемые разными методами
1 – испытания образцов с трещиной на статический изгиб по Ирвину;
2 – динамические испытания стандартных образцов с надрезом Менаже;
3 – изменение сопротивления распространению трещины в условиях плоской деформации при ударном приложении нагрузки

В области I под нагрузкой могут работать металлы без концентраторов напряжений с большой работой зарождения трещины. Эти же металлы могут работать в области II с концентраторами напряжений при отсутствии ударных нагрузок.

В области III такие же материалы могут работать и при ударных нагрузках, если нет предельно острых трещин. В области IV материал может работать и с предельно острыми трещинами с наименьшей вероятностью хрупкого разрушения.

Приведенный анализ показывает, что оценка склонности к хрупкому разрушению должна проводиться дифференцированно с учетом будущих условий работы материала.

Так, самая жесткая оценка материалов (кривая 3) должна применяться в том случае, когда материал работает в условиях ударных нагрузок при наличии острых концентраторов напряжений (трещин). Метод определения ударной вязкости (кривая 2) следует использовать для оценки материалов в том случае, если в дальнейшем из них будут изготавливать детали без острых концентраторов напряжений (без трещин) при возможных ударных нагрузках. Метод статического растяжения с предельно острым надрезом (кривая 1) следует применять для деталей, в которых возможны трещины, работающих при стационарных и циклических нагрузках.

Литература

1. Горицкий В.М. Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.
2. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочность материалов. Том 1. Основы механики разрушения // Справочное пособие в 4 томах. / Под.ред. Панасюка В.В. – Киев: Наукова думка, 1988. – 488 с.
3. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Слепцов О.И. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 768 с.

4. Солнцев Ю.П., Пирайнен В.Ю., Вологжанина С.А. Материаловедение специальных отраслей машиностроения. – СПб: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.
5. Олейник Н.В., Ню Ван Куст //Проблемы прочности, 1976, – № 1. – С. 72-78.
6. Солнцев Ю.П., Титова Т.И. Стали для Севера и Сибири. – СПб: Химиздат, 2002. – 352 с.

УДК 538.91+621.762.5

АДДИТИВНАЯ СТАЛЬ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Б.К. Барахтин, Н.В. Лебедева, М.В. Медведева, П.А. Салей

Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

nad_l@rambler.ru

Аннотация
Структурные исследования нержавеющей стали Х16Н4Д4Б, полученной методом селективного лазерного плавления (СЛП). Использованы методы световой и электронной растровой микроскопии с фиксацией изображений в лучах дифрагированных обратных электронов (ДОЭ). Сформулирована феноменологическая модель упрочнения СЛП металла дисперсными частицами из паров конденсации над зоной плавления металла. Мультифрактальный анализ строения

Ключевые слова
Селективное лазерное плавление, металлические порошки, металографический и мультифрактальный анализы изображений структур.

Введение

В настоящее время получила распространение технология селективного лазерного плавления (СЛП), заключающаяся в послойном формировании трехмерных объектов по их компьютерным моделям [1, 2]. Особенностью СЛП процесса является наличие и взаимодействие участков твердой и жидких фаз в течение кратковременного воздействия лазерного луча. Реализуемые в условиях термодинамической неравновесности локальные акты плавления и структурно-фазовые превращения недостаточно изучены, хотя широко распространены в приложениях с переходными технологическими режимами.

Целью представленной работы является оценка прочности с металлографическим и мультифрактальным анализами изображений СЛП структур.

Методика исследований

Селективное лазерное плавление (СЛП) порошков производилось с помощью установки *EOSINT M*270, в которой лазер мощностью до 200 Вт непрерывно сканирует зону плавления порошка размером до 40 мкм со скоростью до 800 мм/сек (рис. 1).

В проводившихся экспериментах использовались порошки из нержавеющей стали Х16Н4Д4Б (таблица), из которых получали стандартные образцы для испытаний одноосным растяжением.

Структурные исследования выполнялись с помощью светового микроскопа «Аксио Обсервер» и электронного растрового микроскопа «Технай» с фиксацией дифракционных картин обратно отраженных электронов (ДОЭ)[1]. Обработка изображений производилась методами цифровой металлографии, включая мультифрактальный анализ [3].

[1] Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей».

Изображения ДОЭ характеризуют морфологию областей когерентного рассеяния в матрице материала в лучах быстрых электронов. Мультифрактальная аттестация полутоновых изображений выполнялась по их черно-белым (бинарным) отображениям, которые математически рассматриваются в форме статистических множеств разной размерности.

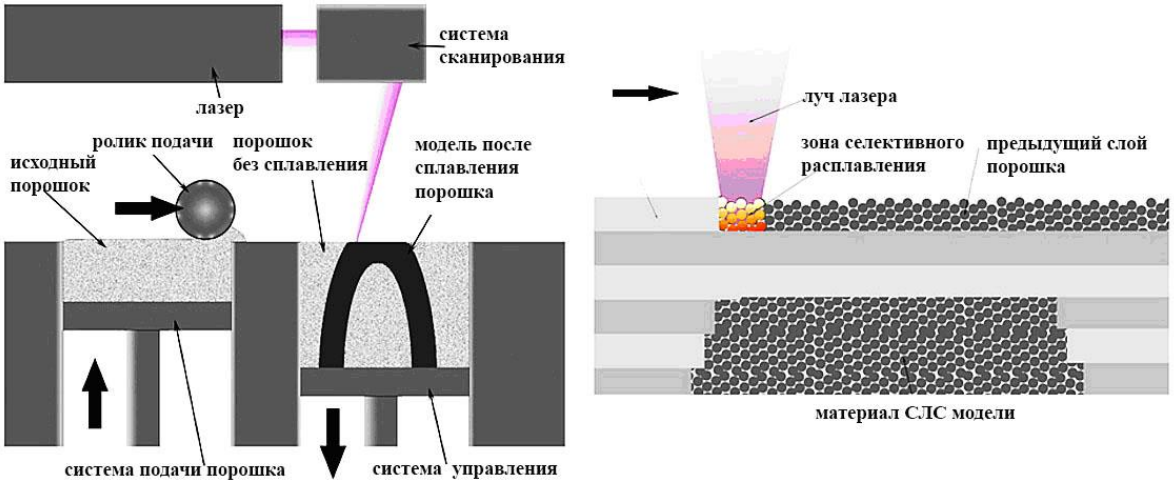


Рис. 1. Схема процесса селективного лазерного плавления

Таблица

Химический состав использованных порошков

Порошки сталей	Основные легирующие элементы, вес.%					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti
Х16Н4Д4Б	0,07	0,38	0,7	15,7	4,0	0,1

Из спектра размерностей Dq вычислялись: пространственная размерность D_0, мера упорядочения δ и мера периодичности K. Здесь q – размерности монофрактальных бинарных подмножеств в интервале от -40 до +40, из которых складывается бинарное отображение исходного полутонового изображения. Пространственная размерность D_0 является количественной оценкой образа, характеризующей заполнение поля изображения. Величина δ чувствительна к нарушениям симметрии для исследуемой структуры в целом. Устремление δ к нулю является признаком хаоса накануне изменения агрегатного состояния. Увеличение значений K указывает на рост периодической составляющей в отображении структур. Результаты мультифрактальной аттестации имеют вероятностно-статистический смысл. Относительные ошибки в определении параметров D_0 составили не более 1%, а в расчетах значений K и δ – менее 2%.

Полученные данные и обсуждение результатов

Средствами световой и электронной растровой микроскопии установлено, что в СЛП образцах присутствуют частицы шаровидной формы величиной от десятых долей микрометра до нескольких микрометров. Правильная геометрическая форма частиц свидетельствовала о том, что они образовались в «свободном» (взвешенном) состоянии без контакта с другими объектами. Такое явление возможно, если при температурах

менее $\frac{2}{3}T_{пл}$[2] происходила конденсация пара в жидкость (П→Ж). Конденсация (К) металла по механизму десублимации П→К или П→Ж связана с условиями охлаждения. В зависимости от температуры и упругости паров могли работать оба механизма. Следы образования капель в виде светящихся треков разлетающихся частиц наблюдались авторами в актах СЛП обработки разных по составу порошков (рис. 2). Из полученных данных следует, что наблюдаемый эффект является общим явлением.

В местах, где энергии луча лазера оказывалось недостаточно, частицы сохранялись в состоянии кристаллизации разной степени завершенности. Частицы участвовали в упрочнении выделениями, а также в активации эпитаксии в микрообъемах сплавления.

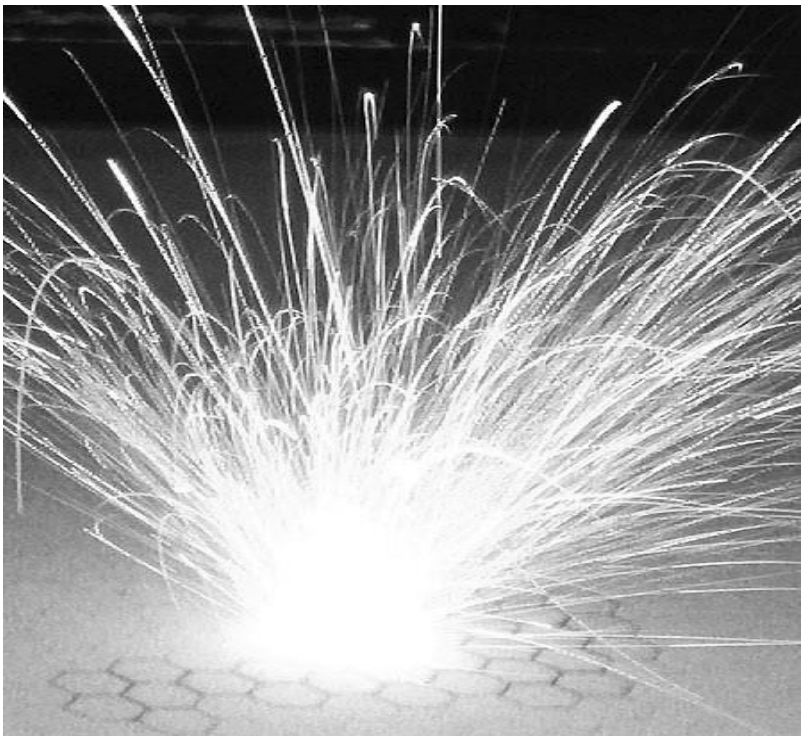


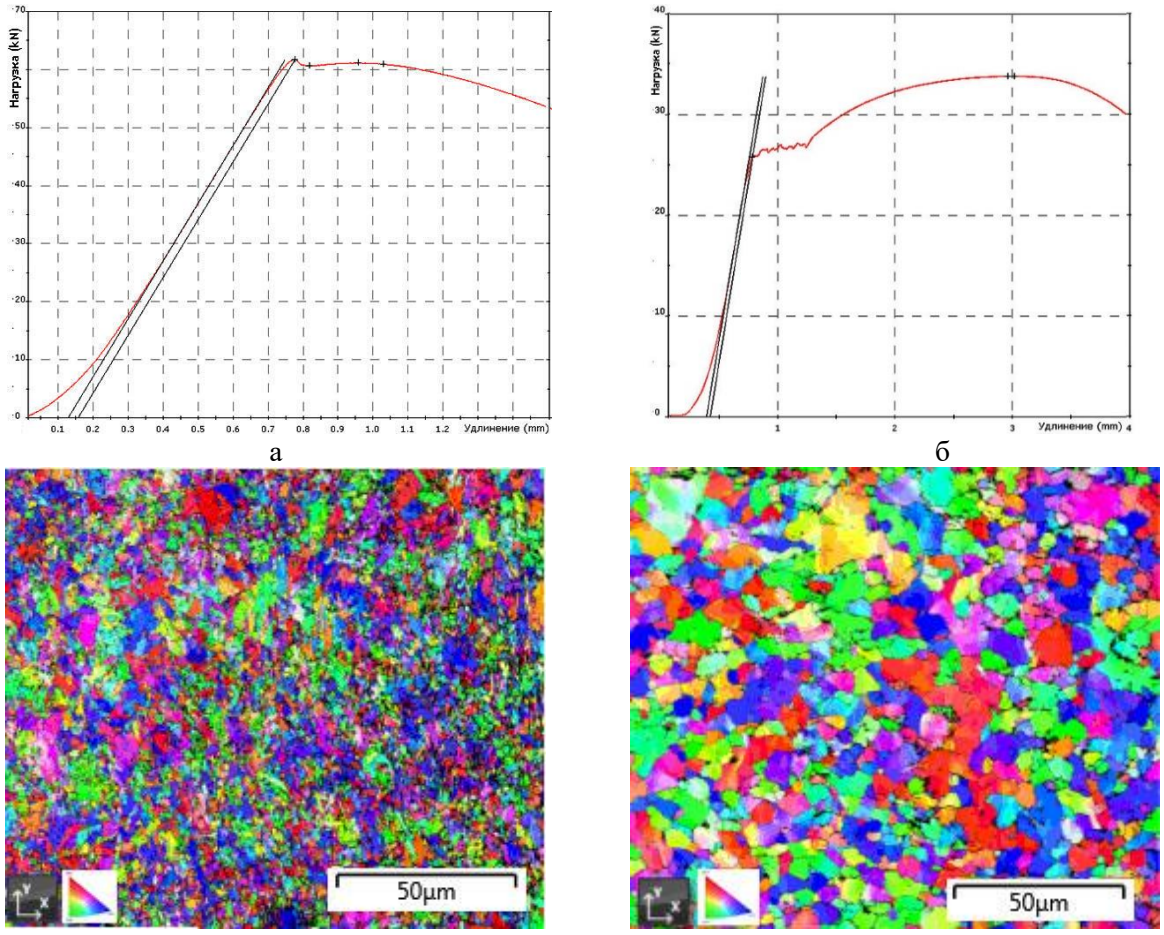
Рис. 2. Треки разлетающихся частиц от места плавления порошка

Механические испытания показали, что СЛП металл обладает высокими механическими свойствами и мелкозернистой неупорядоченной структурой (рис. 3). Отжиг в течение 1 часа при температуре 900°С упорядочил строение металла, но вдвое снизил показатели прочности.

Упорядоченность в расположении зерен определится флуктуациями температуры и химического состава в зоне плавления, возможной конвекцией, примесями и другими факторами [4]. В качестве примеров мультифрактальной параметризации структур выбраны одинаково обработанные изображения зерен, выявленных химическим травлением на шлифах (рис. 4). Результаты мультифрактальной параметризации изображений структур СЛП стали показали, что, несмотря на малые времена воздействия лазерного луча, в объемах твердожидкого состояния металла доминирует упорядоченное периодическое строение, свойственное кристаллизации. Разбросы значений D_0, δ и K говорят о том, что зерна и кристаллы формируются в неодинаковых термодинамических условиях и характеризуются разной морфологией структур [5]. Например, в зернах можно

[2] $T_{пл}$ – температура плавления металла.

обнаружить признаки разупорядоченного или аморфного состояния и поры (D_0 и δ малы), тенденцию к упорядочению (рост δ) с одновременной периодичностью (уменьшение разброса K) и снижением пористости (рост D_0).



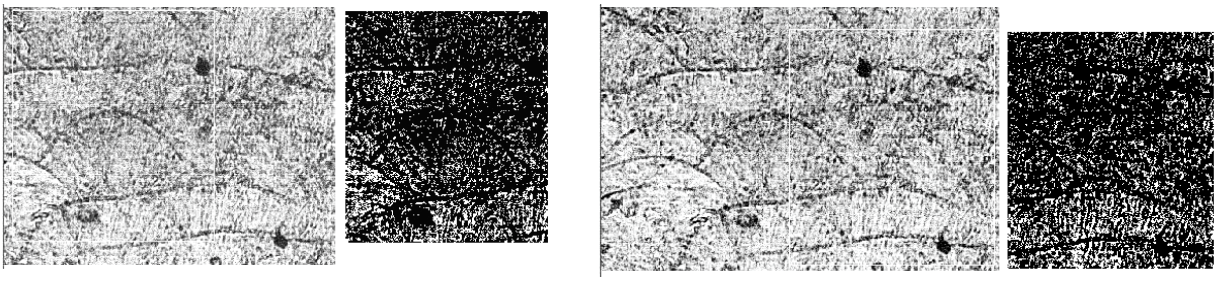
а б

в г

после СЛП построения после отжига

Рис. 3. Кривые растяжения (а,б) и ДОЭ строение СЛП стали Х16Н4Д4Б (в,г) после построения (а,в) и отжига (б,г) образцов

Полученные данные говорят о том, что, несмотря на близкие значения мультифрактальных параметров даже в пределах одного изображения, в объемах размером менее 0,15 мкм происходящие превращения сопровождаются меньшими актами структурных изменений.



D_0=1,858±0,004; δ=0,163±0,003; K=0,498±0,006

Рис. 4. В пределах белых квадратов 256х256 *pcx* примеры мультифрактальной обработки изображений структуры (х100) в СЛП стали Х16Н4Д4Б с указанием полученных данных

Установлено, что рост δ сопровождается возрастанием D_0, указывающем на заполнение кристаллизующейся фазой участка наблюдения. Уменьшение δ свидетельствует о хаотизации в смеси расплава и кристаллов, что приводит к «раскачке» значений *K* (рис. 5).

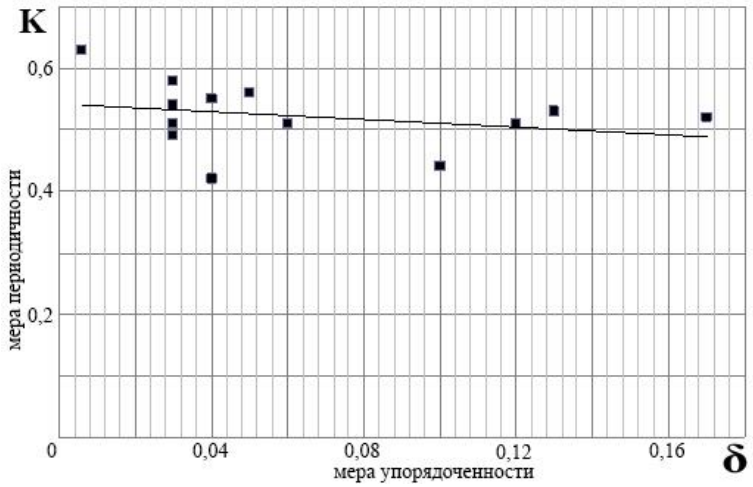


Рис. 5. Результаты мультифрактальной аттестации изображений

Выводы

1. Полученный СЛП материал прочнее традиционной стали аналогичного химического состава.
2. В СЛП материале зародыши новой структуры или фазы образуются не только в объемах между жидкой и твердой фазами, а ранее - над местом плавления путем десублимации пара в твердое состояние.
3. Измельченные зерна, ультрадисперсные частицы конденсированного состояния и иглообразные кристаллиты являются факторами упрочнения.
4. Проведена обработка полутоновых изображений зерен методом статистически-геометрической аппроксимации (мультифрактального анализа). Полученные данные дают дополнительную количественную информацию о произошедших структурных изменениях.

Литература

1. Перевертов В.П., Андрончев, И.К., Абулкасимов М.М. Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии // Надежность и качество сложных систем, 2015. – №3 (11). – С.69-79.
2. Скороход В.В. Наука о спекании: Эволюция идей, достижения, текущие проблемы и новые тенденции. 2. Проблема активного спекания // Порошковая металлургия, 2016. – №1/2. – С. 26-39.
3. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
4. Durand-Charre M. Microstructure of steels and cast irons // Engineering Materials and Pro-cesses.- Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004 – 406 p.
5. Барахтин Б.К., Жуков А.С., Кузнецов П.А., Шакиров И.В. Термодинамика и размерные эффекты в технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков //Тезисы VIII Междунар. Конф. Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии (КРИС-2019), Ижевск: ФГБОУ ВО "Удмуртский государственный университет", 2019. – С. 160-163.

УДК 621.791

РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ РАСПЫЛЕНИИ

Б.С. Ермаков[1, 3], С.Б. Ермаков[1], А. Павленко[2], С.А. Вологжанина[3]

1 – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – Закрытое акционерное общество «Опытный завод «Микрон», г. Великие Луки, Россия
3 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ermakov55@bk.ru

Аннотация
Одним из факторов сдерживающих развитие 3D-технологий является дефицит порошков для аддитивных машин. В СПбПУ выполняются работы по проектированию и изготовлению плазменных атомайзеров, предназначенных для производства порошков металлов и сплавов для аддитивных машин. В работе обсуждаются результаты исследований влияния на гранулометрический состав порошков давления и скорости противопотока, создаваемых в камере распыления при производстве порошков сплавов 08Х18Н10Т и ВЖ98.

Ключевые слова
Аддитивные технологии, плазменная атомизация, порошки металлических сплавов.

Введение

Развитие промышленности на современном этапе можно охарактеризовать как постепенный отход от создания и производства крупносерийных партий машин и механизмов, обладающих усредненным набором характеристик к выпуску единичных и малых серий оборудования, со свойствами, максимально удовлетворяющими конкретного заказчика. Такой путь развития требует изменения целого ряда технологических процессов производства отдельных деталей и узлов, машин и механизмов. К таким изменениям, в первую очередь, относится постепенное замещение вычитающих технологий обработки, например, обработки резанием заготовок, на адддитивные технологии производства методом трехмерной печати (3D). Исследования Wohlers Associates показали, что рынок аддитивных технологий в 2014 году по всему миру представлял приблизительно 3 млрд долларов, учитывая средние темпы роста около 20–30%. Вероятно в ближайшее время объем рынка сможет составить 16 млрд долларов. Наиболее активно замещение вычитающих на 3D-технологии наблюдается в авиационной промышленности, судостроении, энергетическом машиностроении, активно ращвиваясь, в том числе, в стоматологии и восстановительной хирургии [1-3].

К настоящему времени Россия отстает в развитии аддитивных технологий от ведущих стран мира, что связано с отсутствием отечественного производства аддитивных машин, и отсутствием отечественной базы производства металлических порошков мелкодисперсных фракций. К настоящему времени большинство российских предприятий применяют порошки, поставляемые в основном зарубежными компаниями. Как считает академик Е.Н. Каблов, необходимо около 20 тонн порошков в год для российского парка оборудования аддитивных технологий, при этом следует учитывать, что объем потребления порошков будет постоянно увеличиваться [1]. Производство порошков является основной проблемой для аддитивных технологий. От

качества порошка в первую очередь зависит качество получаемых деталей. В настоящее время, особенно, с введением санкций проблема получения порошков для аддитивных технологий стала наиболее острой проблемой, сдерживающей развитие этого технологического направления в нашей стране.

Методы

Распыление – получение металлических порошков диспергированием расплава под действием инерционных сил струей газа, жидкости или плазмы. При получении порошков используют плавление, распыление и затвердевание требуемых металлов и сплавов. В плавильных печах различного типа производят плавление металлов и сплавов под действием электрической дуги или плазмы. Распыление чаще всего осуществляется потоком воды с высоким напором, либо в потоках инертных и нейтральных газов. Распыление различными способами в настоящий момент - основа технологий получения высококачественных металлических. К таким порошкам предъявляют специфическим требованиям относят сферическую форму частиц; чистоту поверхности частиц от окислов и объема металла от посторонних примесей; быструю кристаллизацию; однородную микроструктуру [4]. Чаще всего при получении порошков используют распыление жидких металлов. Несомненным достоинством этого способа можно считать относительную простоту и дешевизну технологического процесса получения порошков металлов с широким температурным интервалом плавления. Процесс распыления металлической струи потоком газа реализовано либо потоком газа, который соосно обтекает струю расплава; либо обтекающим потоком газа, направленным под заданным углом к оси струи; либо перпендикулярно направленным к оси струи газовым потоком. Известно, что при одном из самых эффективных способов распыления процесс протекает при температуре газового потока, которая равна или больше температуры расплава. Однако же, если температура при этом достигает 1500 °С и более, создание таких условий сложно, т.к. возникают трудностей при нагревании газового дутья, а, кроме того, усложняются и дорожают установки, применяемые для распыления. В таких случаях оправдано применение плазменного способа, когда распыление струи расплавленного металла или проволоки происходит за счет кинетической энергии струи высокотемпературной плазмы. Кроме того, применение плазменной атомизации позволяет получать порошки сфероидальной формы. Проволока или порошок при этом способе может быть в качестве исходного сырья. Плазменная струя расплавляет исходную заготовку, капли материала подвергаются распылению, после чего происходит затвердевание монокристальных частиц [3, 4]. Регулируя энергетические параметры плазменного потока [3], например, увеличивая температуру и кинетическую энергию газового потока, можно производить измельчение струи расплава на более мелкие частицы. Размеры и форму получаемых частиц порошка можно регулировать, учитывая физические свойства распыляемого материала и диаметр распыляемой проволоки. Увеличивая диаметр, можно снижать количество частиц малого размера в порошке за счет роста массы расплава, поступающего в зону распыления. Поэтому решение задачи получения частиц требуемых размеров и увеличение выхода товарной продукции является одной из важнейших задач при разработке технологии и режимов плазменного распыления.

Процесс образования металлической частицы при распылении в низкотемпературной плазме может условно быть разделен на несколько последовательных этапов, в ходе которых происходит образование «мелкодисперсных частиц, последующее передвижение и теплообмен в потоке плазмы и в среде, а затем последующий сбор частиц. Сначала производят нагрев фидстока, затем происходит его расплавление благодаря теплоте плазменной дуги. Сравнение времени пребывания капли при плавлении сварочного электрода или сварочной проволоки в среде защитных газов с этим способом показывает, что на торце проволоки в этом случае она пребывает

меньшее время. Действие сил давления дуги, а также реактивных сил, возникающих при при испарении металла и выделении газов, гравитационных сил, сил поверхностного натяжения, электродинамических сил обеспечивает отрыв капли от торца проволоки. В момент отрыва капля характеризуется определенными размерами, температурой и начальной скоростью» [5]. Средний диаметр капли может быть оценен по следующей формуле:

$$d_k = \frac{\pi\sigma d_1 d_2}{M_1 V_1 + M_2 V_2} \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения материала фидстока в зоне контакта металла и плазменной дуги, d_1 – диаметр фидстока, d_2 - диаметр сопла плазмотрона, M_1 и M_2 - масса плазмообразующего и стабилизирующего газа, V_1 и V_2 – скорость плазмообразующего и стабилизирующего газа.

После выхода капли из потока плазмы она движется в контролируемой среде защитного газа, температура которого не превышает несколько десятков градусов, постепенно кристаллизуясь и охлаждаясь. В зависимости от условий распыления, температуры плавления распыляемого материала, длины свободного пробега частицы внутри камеры распыления (до соударения с днищем камеры) защитная среда может иметь пониженное, нормальное или повышенное давление, быть либо неподвижной, либо подвижной со скоростью движения, направленной навстречу движения частицы (противоток). При достижении определенных параметров противопотока возможны даже остановка и изменение направления движения частиц [6].

В СПбПУ проводятся работы по разработке оборудования и технологии плазменного распыления металлов и сплавов и получения порошков для аддитивных машин. Создан ряд плазменных атомайзеров, основанных на различных схемах распыления с одним или несколькими плазмотронами с горизонтальной и вертикальной подачей твердых фидстоков.

Результаты

В данной работе приведены результаты экспериментов по распылению проволоки из нержавеющей стали 08Х18Н10Т и сплава ВЖ98 (0,1%C, W – 15,7%, Cr – 25,2%, Fe -3,7%, Mo -1,4%< (Ti+V+Nb – 0,9%, никель – основа) со свободным пробегом частиц и с противотоком защитного газа - аргона, скорость которого определялась через объем подачи газа в форсунки механизма кипящего слоя для создания противотока. Также регулировалось давление в камере распыления, которое составляло P_0 = 1 ата – свободный проток газа сквозь камеру и P_1 = 1,25 ата – работа на повышенном давлении. Режим распыления был неизменен для обоих материалов - распыление в дуге косвенного действия: U – 130 В, I – 165 А, объем плазмообразующего газа – 1800 л/час, угол подачи проволоки – 90^0 к направлению газоплазменного потока. Объем подачи газа в механизм кипящего слоя - составлял V_0 = 0, V_1 = 5 и V_2 = 10 литров в минуту. В таблицах 1 и 2 приведены результаты гранулометрического анализа полученных частиц в условиях свободного пробега частиц (табл.1) и при создании противопотока – табл. 2. Размер частиц и их процентное содержание определялось путем рассева общей массы распыленного порошка на виброситах с ситами соответствующих размеров ячеек.

Обсуждение

Повышение давления в камере распыления позволяет увеличить долю товарной порошковой продукции, снизить средний диаметр порошковых частиц.

Таблица 1

Гранулометрический состав порошков при свободном пробеге

Диаметр частиц порошка (не менее) мкм	Количество порошка,%		Количество порошка,%	
	Сталь 08Х10Н10Т		Сплав ВЖ98	
	P_0	P_1	P_0	P_1
315	14,3	9,1	12,7	9,0
200	21,1	12,8	16,3	13,4
140	17,8	17,0	18,1	15,2
100	12,8	17,6	13,2	15,5
80	11,3	15,7	12,0	15,4
63	10,5	12,2	11,7	13,0
40	6,2	8,0	9,1	10,1
20	5,9	6,1	7,3	7,0
Менее 20	1,0	1,5	0,6	1,4

Таблица 2

Влияние скорости противопотока состав порошков (P_0 = 1 ата)

Фракция мкм*	К-во порошка,%		К-во порошка,%	
	Сталь 08Х10Н10Т		Сплав ВЖ98	
	V_1	V_2	V_1	V_2
315	13,6	13,2	12,2	12,0
200	20,0	19,2	16,0	15,9
140	17,8	17,6	18,0	17,1
100	13,2	13,4	13,4	13,2
80	11,7	12,2	11,9	12,6
63	10,8	11,2	11,8	12,2
40	5,8	6,1	8,8	9,5
20	5,8	5,7	7,3	6,5
Менее 20	1,3	1,4	0,8	1,0

Создание противопотока в камере распыления весьма незначительно сказывается на процентном распределении частиц порошков обоих материалов, но способствует получению порошков лучших геометрических форм – получаемые при создании протовопотока порошки имеют практически идеальную сферическую форму, в порошковой массе практически отсутствует сателлиты – сплавленные друг с другом частицы порошка (рисунок).

а) б)

Рисунок. Виды получаемых порошков: а) стали 08Х18Н10Т; б) ВЖ98

Выводы

На основании проведенных исследований была показана зависимость размеров получаемых порошков от величины избыточного давления в камере распыления, доля товарной продукции (порошки диаметром 80 – 20 мкм) при нормальном давлении составляла для стали 08Х18Н10Т – 33,9%, для сплава ВЖ98 – 39,8%, при повышенном до 1,25 ата давлении – 42 и 45,5% соответственно. Таким образом, путь создания в камере распыления избыточного давления может быть признан перспективным для дальнейших исследований.

Литература

1. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы// Интеллект и технологии 2015.- №2(11). – С. 52-55.
2. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность// Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. – №2, С. 11-22.
3. С.Б. Ермаков, Ермаков Б.С., Сулейменов Э.А., Протопопов А.В., Абдалиев М.А. Порошковые материалы. Алма-Ата: Гылым, 1991. – 344 с.
4. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб, Изд. СПбПУ. 2013. – С. 222.
5. Струков Н.Н. Разработка технологии плазменного рапыления прутковых материалов в камере с противопотоком //Автореф. дисс. на соиск. степ. канд.техн.наук. – Пермь, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 2012 г.
6. Дресвин С.В., Иванов Д.В. Основы мат. моделирования плазмотронов. СПб., Изд. СПбПУ. 2004. – С. 227.

УДК 621.762

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПЫЛЕННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ТРУБ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Б.С. Ермаков[1, 3], А.А. Альхименко[1], Н.О. Шапошников[1], С.Б. Ермаков[1], Т.Е. Шатский[2], А.Ф. Иголкин[3]

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – Газпромнефть, Научно-Технический Центр, Санкт-Петербург, Россия
3 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ermakov55@bk.ru

Аннотация
Наиболее повреждаемые элементы нефтепромысловых трубопроводов – сварные соединения, ресурс которых, зачастую не превышает одного-двух лет. Проблема обеспечения антикоррозионной защиты внутренних поверхностей сварных соединений труб не решена до настоящего времени. В данной работе рассматривается возможность нанесения на внутренние кромки трубы, примыкающих к кольцевому сварному шву порошковых защитных нержавеющих покрытий. Приведены исследования коррозионной стойкости и механических свойств сварных соединений труб.

Ключевые слова
Нефтепромысловый трубопровод, коррозионная повреждаемость сварных соединений, плазменное распыление порошков, металлизационная порошковая наплавка

Введение

Среди наиболее повреждаемых объектов нефтедобычи промысловые трубопроводы являются одними из наиболее повреждаемых объектов. Хотя нефть, сама по себе и не является агрессивной средой, наличие в промысловых нефтепродуктах солей, хлорных соединений, кислорода, сероводорода, высокоминерализованной воды снижают коррозионную стойкость труб, а наличие в этом субстрате высокоабразивных частиц приводит к возникновению и развитию абразивных повреждений. Анализ реальных сроков эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов Западной Сибири показывает, что коррозионные и эррозионные дефекты снижают срок службы трубопроводов во много раз. Иногда такой срок службы не достигает даже одного года [1], причем основные повреждения концентрируются в зонах сварных соединений труб. Для снижения эффекта коррозионной повреждаемости было разработано несколько методов защиты металла сварных соединений, направленных как на деактивацию коррозионно-агрессивной среды, так и на создание защитных приспособлений, препятствующих контакту агрессивной среды и поверхности металла. При проведении мероприятий по деактивации транспортируемого продукта используются ингибиторы коррозии, однако их применение не всегда технически оправдано, что связано как с неравномерным распределением ингибитора по длине трубы, так и необходимости периодической остановки перекачки на время проведения операций ингибирования. Еще одним путем является путь снижения агрессивности коррозионных продуктов непосредственно в скважине, например, за счет создания высоких скоростей транспортировки нефтепродукта в «эмульсионном» режиме для ликвидации расслоения продукта и выделения из него агрессивных составляющих. Широко

используется метод протекторной защиты, метод применения труб с повышенной толщиной стенки, учитывающей прибавку толщины «на коррозию», метод создания футеровочных покрытий внутренних поверхностей труб. Такие покрытия изготавливают из относительно недорогих и легко наносимых органических и неорганических материалов, в основном, на основе термореактивных пластмасс и эластомеров. Покрытия позволяют решить проблему защиты основного металла трубы от коррозионно-эрозионного воздействия среды, однако, обладая низкой теплостойкостью, выгорают или испаряются в местах сварки труб. При этом в трубопроводе возникают зоны повышенной коррозионной дефектности – зоны сварных соединений, число которых на одном километре трубопровода достигает ста штук.

Анализ работоспособности и повреждаемости трубопроводных систем показал, что существует несколько основных механизмов повреждения сварных стыков трубопроводов. Главную опасность для трубопроводов представляет собой общая и избирательная коррозия в нейтральных водных средах с pH 6-8, содержащих сероводород и углекислый газ, также загрязнённых твердыми включениями. Возникновение повреждений проявляется через механизм коррозионно-эрозионного износа и развития коррозионных дефектов по классическому механизму электрохимической коррозии, который усиливается за счет абразивных частиц, которые постоянно разрушают пассивированный окисный слой на поверхности металла, препятствуя затуханию коррозионных процессов. Также возможно развитие дефектов по механизму сульфидного растрескивания под напряжением и водородного растрескивания.

Методы

К настоящему времени практически единственным методом защиты сварных соединений является метод установки защитных втулок, устанавливаемых при сборке трубопровода. Защитная втулка представляет собой металлическое кольцо с антикоррозионным покрытием. При ее установке достигается изоляция зоны сварного соединения от перекачиваемой среды, замедляются процессы коррозии. Однако, этот метод имеет ряд существенных недостатков, к числу которых относится уменьшение проходного диаметра трубопровода, усложняющего гидродинамику прокачки продукта, усложнение технологии выполнения ремонтных работ, повышение стоимости монтажных работ и трубопровода в целом. Таким образом, представляется возможным констатировать тот факт, что задача защиты внутренних поверхностей сварных соединений нефтепромысловых трубопроводов до сих пор окончательно не решена и остается одной из наиболее актуальных проблем, стоящих перед крупными нефтяными компаниями. В Санкт-Петербургском политехническом университете совместно с НТЦ разработана методика и проведены исследования нанесения комбинированных защитных покрытий, состоящих из полимерного покрытия основного металла трубы и защитного кольца нержавеющей стали в зоне сварного соединения. Ширина металлического кольца покрытия должна, гарантировано превосходить ширину зоны термического влияния кольцевого сварного шва, а полимерное покрытие должно быть нанесено на внутреннюю поверхность труб таким образом, чтобы оно перекрывало зону металлизации за пределами зоны термического влияния сварного шва. В работе были проведены исследования по созданию защитных металлических покрытий зон сварных соединений труб для промысловых трубопроводов. Исследования были выполнены на модельных объектах - образцах на труб диаметром 109 мм и длиной 300 мм, изготовленных из стали 09Г2С.

Известно, что металлические покрытия на внутреннюю поверхность труб могут быть нанесены различными способами, методом наплавки нержавеющей проволоки в среде инертного газа, лазерной наплавки, плазменного напыления металлического порошка [2]. На первом этапе работ была проведена предварительная оценка каждого

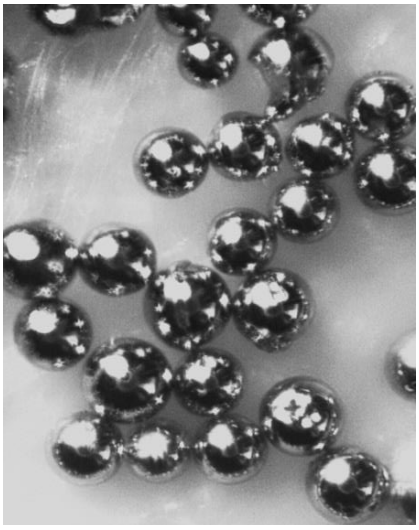
из методов и изучены основные достоинства и недостатки каждой технологии. Преимуществом наплавки в среде аргона явилась технологическая простота процесса, возможность широкой автоматизации и роботизации установки для нанесения наплавок, использование стандартных присадочных проволок. К недостаткам можно отнести низкое качество (высокую шероховатость) поверхности наплавки – невозможность получения равнотолщинного покрытия без дополнительной механической обработки, сложность контроля качества наплавки на предмет обнаружения пор и других микродефектов поверхности. Эти недостатки, выявленные в ходе исследований, не позволили рекомендовать технологию наплавки при нанесении металлизационных покрытий, поэтому основное внимание было уделено методом лазерной наплавки и плазменного напыления. Достоинствами методов плазменного напыления и лазерной наплавки является то, что полученные покрытия обеспечивают равномерную толщину слоя, возможность регулирования этой толщины от максимальной на торце трубы и постепенно уменьшающейся по мере удаления от торца, относительную простоту контроля качества нанесенного покрытия. Все это делает методы нанесения порошковых металлизационных покрытий крайне привлекательными и может позволить минимизировать изменение внутреннего диаметра труб в зоне переходного слоя, где на поверхность металлизации будет наноситься полимерное покрытие. Общим недостатком этих методов является необходимость использования металлических порошков, обычно применяемых в аддитивных машинах, к которым предъявляется специальные требования по форме (сферическая или приближающаяся к сферической форма частиц, отсутствие или минимальное количество сателлитов – т.е. частиц сплавившихся между собой при распылении порошка) и размерам – от 60 до 160 мкм, отсутствию на поверхности порошковых частиц окисных пленок и т.п. Главным из недостатков этих методов является дефицитность и высокая стоимость металлического порошка, используемого для нанесения покрытия. Такие порошки на территории Российской Федерации производятся в весьма малых объемах, а закупка импортного порошка сопряжена с рядом сложностей по его доставке и хранению - из-за высокой химической активности и склонности к окислению мелкодисперсных порошков. Это приводит к определенным ограничениям по срокам и объемам его использования и хранения. Для удешевления процесса нанесения металлизированных наплавок необходимо применение комплексного подхода, когда в наплавочный комплекс входит не только установка по нанесению порошкового покрытия, но и установка по изготовлению такого порошка. Наличие собственной системы атомизации позволяет снизить затраты на порошок, себестоимость которого обычно в два-три раза ниже стоимости мелкооптовых партий на рынке РФ; применять при напылении порошки различных составов, подбирая оптимальную для каждой агрессивной среды собственную защитную композицию; сводит к нулю сроки доставки порошков, позволяет, с одной стороны, иметь, необходимый технологический резерв наносимого материала, с другой не создавать сложных складских систем по хранению порошков. Обеспечение необходимых требований к металлическому порошку может быть достигнуто при получении порошка методом диспергирования расплава. Диспергирование - наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов - до 70% объема всех промышленных порошков получают именно этим методом [3]. Его широко применяют при производстве порошков многокомпонентных сплавов - диспергирование позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют сферическую или близкую к сферической форму частиц. Для производства металлического порошка из нержавеющей стали был использован метод плазменного распыления проволоки в

плазменном атомайзере, разработанном и изготовленном в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (рисунок). Плазменное распыление относится к газовой атомизации, когда расплавленная в дуге плазмотрона капля металла распыляется струей плазмообразующего газа. В качестве генератора плазмы в плазменном атомайзере были применены плазмотроны с фиксацией дуги при помощи межэлектродных вставок, которые позволяют получить восходящую вольтамперную характеристику дуги, обеспечивающую устойчивую работу плазмотрона без балластного сопротивления в цепи электропитания от источника с жесткой характеристикой. Атомайзер позволяет получать порошки сферической формы размерами от 10 до 500 мкм, производительность атомайзера в зависимости от химического состава материала, необходимого размера частиц и других требований может изменяться от 1 до 5 кг порошка в час.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований была поставлена и решена задача отработки технологии получения порошка из стали 08Х18Н10Т сферической формы с размерами частиц от 40 до 80 мкм. В ходе проведения исследований в качестве факторов варьирования были приняты – сила тока от 150 до 250А, скорость (расход) плазмообразующего газа от 30 до 40 литров в минуту, скорость подачи проволоки от 0,5 до 5 метров в минуту.

А



Б

Рисунок. Камера распыления плазменного атомайзера – А; форма частиц порошка при анализе на оптическом микроскопе ($D_{ср}$ = 50 мкм) – Б

При проведении работы был использован математический квази-D-оптимальный план второго порядка. Оптимизация технологических параметров процесса распыления позволила получить сферический порошок нержавеющей стали (рисунок), с содержанием частиц заданных размеров (в общей массе распыленного порошка) порядка 30%. Полученный порошок был нанесен на внутренние поверхности образцов труб 109х7 мм из стали 09Г2С длиной 150 мм. Поверхность для нанесения покрытия была заранее подготовлена – механически очищена от оксидной пленки и обезжирена органическими растворителями. Ширина наносимого покрытия составила – 50 мм, толщина покрытия составляла -1 мм у торца трубы и 0,6 мм на расстоянии 50 мм от торца. После нанесения покрытия торцы труб были разделаны по стандартной технологии по ГОСТ 16037-80 и сварены по технологии, и режимам, применяемым при монтаже нефтепромысловых трубопроводов компании «Газпромнефть». В процессе сварки корень шва – со стороны защитного покрытия заваривался нержавеющим электродом марки Св-04Х19Н9, а заполнение разделки велось сварочной проволокой

Св-08Г2С. Полученные соединения были разрезаны на образцы для металлографических исследований, механических и коррозионных испытаний. Механические испытания, выполненные в соответствии с ГОСТ 6996-66, подтвердили качество выполнения сварного соединения – разрушение образцов после всех испытаний произошло вне зоны сварного соединения, показав результаты, соответствующие требованиям ГОСТ 32678-2014.

При визуальном осмотре и металлографических исследованиях установлено, что после сварки расслоений основного металла и покрытия, нанесенного лазерной наплавкой и плазменным напылением не обнаружено. Образцы, разрушенные в ходе механических испытаний, не имели четкой привязки места зарождения и развития трещины. Одним из важнейших испытаний материалов с покрытием являются испытания на загиб [4]. Такие испытания были проведены на разрывной машине с установкой образца с покрытием на опоры и изгибом его вокруг оправок, имеющих диаметр, равный двух-, трех- и четырехкратной толщине трубы – 14, 21 и 28 мм. Ширина образца была равна удвоенной толщине – 14 мм, а длина – 200 мм. Образцы изготавливались таким образом, чтобы центр загиба приходился на зону металлизированного покрытия. Загиб осуществлялся на угол 90^0. Были проведены две серии испытаний – в первой образцы загибались так, чтобы покрытие испытывало растягивающие напряжения, во второй – сжимающие. Результаты испытаний приведены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний на загиб

вид покрытия	Загиб на угол 90^0					
	растяжение на оправке D, мм			сжатие на оправке D, мм		
	14	21	28	14	21	28
плазменное напыление	М, О	М	-	М	-	-
лазерная наплавка	ММ	М	-	М	-	-

* М – одиночные микротрещины, ММ – многочисленные микротрещины, О – отслоение.

Таким образом, только в условиях жесткого загиба на оправке диаметром 14 мм были обнаружены значимые дефекты. На оправке диаметром 28 мм – дефектов не обнаружено, на оправке диаметром 21 мм были обнаружены две микротрещины на двух из пяти образцов после плазменного напыления и на одном из пяти после лазерной наплавки. Такие результаты могут быть признаны удовлетворительными.

Склонность сварного соединения, защищенного металлизационными покрытиями, к общей коррозии определялась путем проведения коррозионных испытаний при выдержке образцов в коррозионной среде (в растворе 3,5% NaCl в течение 240 ч). Для оценки коррозионной стойкости были изготовлены образцы, поверхность которых захватывала основной металл, сварной шов и покрытие. Оцениваемыми характеристиками являлись: внешний вид и потеря массы. Торцы образцов были изолированы с помощью лакокрасочного покрытия. Покрытие и сварной стык – без изоляции. Установлено, что после коррозионных испытаний в зоне защитных металлизационных покрытий коррозионные продукты и коррозионные дефекты полностью отсутствуют. В зонах сварного соединения, не защищенного металлизационным покрытием (контрольные образцы), были обнаружены

протяженные рыхлые продукты коррозии, язвины глубиной до 1,5 мм и диаметром до 5 мм.

Выводы

По результатам испытаний было установлено, что защита сварного соединения покрытием, нанесенным плазменным напылением и лазерной наплавкой выполняет свою функцию в полном объеме. Порошки, полученные на плазменном атомайзере обеспечивают необходимые форму и размеры частиц. Предложенная технология, после проведения комплексных испытаний на опытных участках трубопроводов может быть рекомендована для применения при сборке промысловых трубопроводов.

Литература

1. Радионова И.Г., Бакланова О.Н., Шаповалов Э.Т. О методах оценки коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных трубных сталей в условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов.// Металлург. 2005. – С. 44-50.
2. Ермаков Б.С. Технология конструкционных материалов. СПб.: Изд. СПбГУНИПТ. 2005. 174 С.
3. Ермаков С.С., Ермаков Б.С. Физическое металловедение2014. //Порошковые и композиционные. Материалы. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. - 132 С.
4. Юдин П.Е., Петроов С.СМ., Федотова А.В, Елистратова Н.В., Марков Ю.М./ Исследование возможности применения биметаллического листового проката Х70+316L для изготовления коррозионностойких фасонных изделий ТЭК.// Трубопроводный транспорт. 2014. – С.16-18.

УДК 621.74:669.018

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ МОРСКОГО КЛИМАТА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

С.Б. Ермаков[1], Б.С. Ермаков[1,2], А.К. Андреев[2]

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

s.b.ermakov@bk.ru

Аннотация
Движение добывающих и перерабатывающих производств на Север ставит задачу анализа работоспособности традиционно применяемых в конструкциях и изделиях материалов. В работе приведены результаты сравнительных исследований магниевого сплава МА2-1 и алюминиевого сплава АМг6 в условиях морского климата северных широт. Исследования проведены после и имитации условий длительных эксплуатации и хранения оборудования из этих сплавов в условиях северных широт, а именно после длительных до 1000 час выдержек при температуре -60^{0}С, старения в камере соляного тумана, проведен анализ влияния на механические свойства типичных для северных широт внешних климатических факторов и сравнительная оценка коррозионной стойкости сплавов в условиях морского климата.

Ключевые слова
Легкие сплавы, низкотемпературные свойства, коррозионная стойкость.

Введение

Первоочередной задачей, стоящей перед страной является освоение шельфовой зоны Арктических морей и примыкающих к ним береговых территорий, в недрах которых находятся значительные запасы углеводородов, рудных месторождений таких дефицитных и дорогостоящих металлов как золото, платина, вольфрам, медь, кобальт, никель, олово. Движение добывающей и перерабатывающей промышленности на север ставит задачу по-новому рассмотреть возможность использования в условиях морского климата Северного Ледовитого океана таких традиционных конструкционных материалов как сплавы алюминия и магния.

Методы

Легкие сплавы все шире применяются в конструкциях и изделиях различного назначения. Их применение становится особо актуальным в оборудовании с жесткими требованиями к массогабаритным характеристикам. Такие сплавы, обладая относительно высокой удельной прочностью, и имея плотность в несколько раз ниже плотности традиционных сталей, уже нашли свое применение в авиа- и судостроении, оборудовании добычи и переработки углеводородного сырья, радиотехнике и т.п. К числу таких материалов относятся широко применяемые легкие сплавы алюминия и магния [1]. В данной работе были проведены сравнительные испытания двух сплавов – МА2-1 – деформируемый сплав магния, содержащий 0,2-0,6% марганца, 3,8-5,0% алюминия, 0,6-1,5% цинка; и деформируемый алюминиевый сплав АМг6 (5,8-6,8% магния, 0,5-0,8% марганца, в сумме до одного процента железа, кремния, титана, меди и цинка). Сплав МА2-1 в основном используется в виде листовых заготовок, прутков, плит и широко применяется в корпусах приборов, в корпусных элементах мобильной

техники, электронных системах, для сварных деталей сложной конфигурации, деталей арматуры, бензо- и маслосистем. Сплав АМг6 применяется для изготовления сварных деталей емкостей и трубопроводов: обечаек, днищ, фланцев, трубных решеток и т. п. Полуфабрикаты из сплава АМг6 нашли применение в судостроении [2]. В работе были использованы прутки обоих сплавов диаметром 100 мм по ГОСТ 21488-97 – сплав АМг6 и ГОСТ 18351-73 сплав МА2-1. Особенностями оборудования используемого в условиях морского климата северных широт является длительное нахождение (хранение и эксплуатация) оборудования на открытом воздухе в условиях крайне низких температур, обледенения рабочих поверхностей (образование инея); при оттаивании и в условиях высокой влажности возможно образование, в рабочих узлах капель воды (росы). В теплую часть года оборудование подвергается агрессивному коррозионному воздействию морского воздуха [3, 4]. Влияние этих факторов должно быть исследовано при определении возможности использования сплавов АМг6 и Ма2-1 в качестве корпусов и других узлов систем, длительно эксплуатируемых в прибрежных зонах северных морей. Проведены исследования влияния вышеперечисленных факторов на механические свойства сплавов. Воздействие длительного пребывания на открытом воздухе было сымитировано захолаживанием образов для испытаний на растяжение и ударный изгиб в климатической камере при температуре минус 60°С. Время захолаживания изменялось от 200 до 1000 час. Влияние таких внешних климатических факторов как иней и роса также были сымитированы в условиях климатической камеры. Иней – те же образцы помещались в климатическую камеру и выдерживались при температуре минус 60 °С в течение 100 час с периодической продувкой камеры влажным водяным паром для образования устойчивой корки льда на рабочих поверхностях образцов. Обработанные таким образом образцы помещались в захваты испытательных машин. Время переноса составляло не более 60 с, что позволяло сохранить ледяную корку на время проведения испытаний. Роса – температура в камере составляла 20ºС, влажность 95%, время выдержки 100 час. Влияние морского воздуха было сымитировано двумя способами – первый выдержкой образцов для механических испытаний в камере соляного тумана при температуре 35 ºС – выдержка 100 час, второй – путем проведения испытаний на стойкость сплавов против коррозии согласно требованиям ЕСЗКС ГОСТ 9.913-90. Для проведения испытаний по ГОСТ 9.913-90 были подготовлены образцы двух видов – диски диаметром 100 мм и толщиной 2,5 мм и образцы для механических испытаний. Образцы, закрепленные на нейлоновых нитях, были полностью погружены в реактивно-коррозионную среду, нагретую до температуры 23°С и представляющую собой 3% раствор хлористого натрия с добавлением 1% перекиси водорода. Такой состав реагента и условия испытания были выбраны в соответствии с требованиями, предъявляемыми к категории исполнения оборудования для данного климатического района, условиям его эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. В ходе испытаний 1 раз в пять дней в испытательную среду добавлялся 0,1% раствор перекиси водорода, сам раствор заменялся каждые 10 дней испытания. При замене раствора происходила фотофиксация фактического состояния поверхности дискообразных образцов.

Результаты и обсуждение

Результаты механических испытаний сплавов приведены в табл. 1. Как следует из приведенной таблицы сплав АМг6 практически не подвержен воздействию внешних климатических факторов, его свойства после длительных воздействий, имитирующих воздействие внешних климатических особенностей эксплуатации оборудования в условиях прибрежных зон северных территорий остается практически неизменным. Свойства сплава МА2-1 также не претерпевают изменений под действием температурного и ледового воздействия. В то же время, испытания образцов сплава

после выдержки их в соляном тумане, показали резкое снижение временного сопротивления, пластичности и ударной вязкости. Визуальный осмотр поверхности образцов после выдержке в камере соляного тумана показал, что их поверхность покрыта слоем отложений белого цвета. После удаления слоя отложений на поверхности ударных образцов и образцов, предназначенных для испытаний на одноосное статическое растяжение, на поверхностях рабочих частей образцов были обнаружены коррозионные дефекты типа плоских язвин, диаметром до 2-4 мм и глубиной более 1 мм.

Таблица 1

Механические свойства сплавов АМг6 и МА2-1 после длительного воздействия внешних климатических факторов*

Климатическое воздействие	Т	сплав АМг6				сплав МА2-1			
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	KCV	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	KCV
	°С	МПа		%	Дж/см^2	МПа		%	Дж/см^2
Состояние поставки	20	370	173	24	31,6	255	155	11	22,7
	-60	410	180	21	27,4	310	215	8	16,4
Захолаживание при минус 60 °С - 200 час	20	375	176	24	32,0	260	160	12	22,1
	-60	408	179	20	27,2	310	210	8	16,2
Захолаживание при минус 60 °С - 500 час	20	371	175	23	31,3	257	157	11	21,0
	-60	412	181	21	27,0	305	211	8	15,8
Захолаживание при минус 60 °С - 1000 час	20	370	177	24	31,3	260	160	10	20,8
	-60	415	182	21	27,5	305	155	9	15,4
Выдержка в соляном тумане 35 °С – 100 час	20	369	171	23	31,0	210	150	4	11,9
	-60	404	179	20	27,3	235	205	1	8,7
Иней	20	372	170	23	31,2	252	155	10	22,0
	-60	410	183	21	27,5	310	200	8	16,2
Роса	20	370	174	24	31,6	256	160	11	22,3
	-60	407	181	21	27,0	311	205	9	16,5

* Примечание. Размеры рабочих частей всех образцов измерялись до имитации внешних климатических воздействий

Для уточнения коррозионной стойкости сплавов были проведены дополнительные коррозионные испытания образцов. Испытания были проведены путем полного погружения образцов в раствор, содержащий 3% хлористого натрия и 0,1% перекиси водорода. Оценка результатов испытаний была проведена по изменению внешнего вида образцов; наличию, глубине и количеству коррозионных повреждений, а также по изменению механических свойств образцов после агрессивного воздействия среды. Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рисунке.

а б

Рисунок. Образцы после коррозионных испытаний в течение 1000 час:
а – сплав АМг6, б – сплав МА2-1

Результаты механических испытаний сплава АМг6 после 100- часовой выдержке в среде 3% хлористого натрия и 0,1% перекиси водорода приведены в табл. 3. Образцы для проведения механических испытаний сплава МА2-1, выдержанные в течение 1000 час в растворе 3% хлористого натрия и 0,1% перекиси водорода оказались полностью повреждены коррозией и провести их испытания не представлялось возможным.

Таблица 2

Описание коррозионных повреждений образцов сплавов АМг6 и МА2-1

Время, час	описание состояния поверхности образца
до испытаний	образцы механически обработаны на Ra 2,0 мкм,
Сплав АМг6	
240 час	Поверхность образца покрыта тонким полупрозрачным слоем отложений
720 час	Поверхность образца полностью закрыта слоем отложений белого цвета, на поверхности образца отмечены отдельные язвины диаметром до 0,2 мм.
1000 час	Поверхность образца полностью закрыта слоем отложений белого цвета. На поверхности образца видны цепочки мелких коррозионных язвин. Диаметр язвин – не более 0,3 мм. Отмечены одиночные язвины диаметром до 1,0 мм и глубиной до 0,5 мм.
2500 час	Поверхность образца полностью закрыта слоем отложений белого цвета. На поверхности видны коррозионные язвины глубиной более 0,5 мм, диаметром до 2,5 мм
Сплав МА2-1	
24 час	Поверхность образца потеряла металлический блеск, полностью покрыта тонким окисным пленом Видны отдельные коррозионные язвины, в основном, сосредоточенные в периферийной части образца.
48 час	Поверхность образца полностью покрыта слоем отложений серого и серо-зленого цветов. Обнаружены многочисленные коррозионные язвины. После удаления поверхностных отложений на поверхности образца обнаружены плоские язвины коррозионного характера. Глубина – до 0,25 мм, протяженность до 1,5 мм. Плотность дефектов – 2-3 язвины на 1 см^2
500 час	Поверхность образца полностью покрыта слоем рыхлых коррозионных отложений серого и бело-серого цветов. Отложения легко отслаиваются от поверхности образца. В периферической части образца обнаружены крупные коррозионные дефекты, глубиной до 1 мм.
1000 час	Поверхность образца полностью покрыта слоем рыхлых коррозионных отложений серого и бело-серого цветов. Отложения легко отслаиваются от поверхности образца. Состав отложение – оксиды и хлориды магния и хлориды алюминия. В периферической части образца обнаружены многочисленные крупные коррозионные язвины, том числе сквозные.

Таблица 3

Механические свойства сплава АМг6 выдержки 1000 час в коррозионной среде

Т испыт., ^{0}С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCV, Дж/см^2
20	365	171	11	31,2
-60	412	181	8	27,0

На основании проведённых испытаний коррозионной стойкости сплавов АМг6 и МА2-1, было установлено, что оба сплава сохраняют стабильность механических свойств в ходе длительной низкотемпературной эксплуатации, что подтверждается результатами механических испытаний образцов после таких внешних климатических воздействий как длительное пребывание в условиях низких климатических температур, обледенения, выпадения конденсированной влаги (росы) и могут быть использованы для изготовления корпусов и других узлов и деталей оборудования, эксплуатируемого в условиях Крайнего Севера и Арктики. Особое внимание при назначении материала для изготовления низкотемпературного оборудования следует уделять условиям, в которых будет эксплуатироваться это оборудование. Магниевый сплав МА2-1 подвержен коррозии под действием хлор-ионной среды, воздействие которой приводит к возникновению и развитию коррозионных дефектов типа язвин, развивающихся по механизму обшей коррозии. Даже в течение 2 суток испытаний глубина коррозионных язв составила 0,25 мм, диаметр до 1,5 мм. Плотность дефектов – 2-3 язвины на 1 см^2. При дальнейшей выдержке образцов в коррозионной среде плотность коррозионных дефектов увеличивается и после 1000 часовой выдержки разрастается в практически непрерывное поле, были обнаружены сквозные коррозионные повреждения. Таким образом, показано, что применение сплава МА2-1 может привести к ускоренному разрушению изделий, эксплуатируемых и хранящихся в условиях морского климата. Анализ поверхностей образцов сплава АМг6 после коррозионного воздействия показал, что сплав имеет значительно большую сопротивляемость агрессивной хлор-ионной среде, однако, в ходе исследований поверхности образцов после 1000 и 2500 часовых выдержек в агрессивной среде были обнаружены повреждения, развивающиеся по механизму язвенной коррозии и коррозионные отложения хлоридов и оксидов.

Выводы

Показано, что сплавы АМг6 и МА2-1 могут быть рекомендованы для изготовления оборудования, эксплуатируемого на открытом воздухе в условиях северных широт. Однако, при назначении материала для изготовления оборудования необходимо учитывать дополнительные климатические условия эксплуатации и зону расположения оборудования. Если в областях удаленных от морей эти сплавы могут использоваться без ограничения, то в условиях морского климата применение магниевого сплава возможно только при использовании защитных покрытий [5].

Также на основании проведенных исследований было установлено, что относительно кратковременное использование оборудования из сплава АМг6 в условиях морского климата северных широт (порядка сотен час) не нуждается в дополнительных мероприятиях по антикоррозионной защите. Длительное коррозионное воздействие среды приводит к появлению на поверхности сплава АМг6 коррозионных дефектов в виде к коррозионных язвин, рыхлостей, цепочек мелких коррозионных дефектов. Слой коррозионных отложений состоит из двух групп отложений – первая – плотный пассивирующий слой оксида алюминия с хорошей адгезией к поверхности образца, вторая – отдельные конгломераты рыхлых, легко удаляемых с поверхности образца отложений оксида и хлорида магния и хлорида алюминия. Поэтому, несмотря на то, что по результатам механических испытаний не было обнаружено влияния коррозионной среды на механические свойства сплава, для

предотвращения коррозионной повреждаемости и потери работоспособности оборудования, предназначенного для длительной эксплуатации в условиях морского климата, рекомендуется защитить поверхности оборудования защитными антикоррозионными покрытиями.

Литература

1. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов//Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7-17.
2. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Слепцов О.И. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 768 С.
3. Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Васильев А.В., Каргинова В.В. Межкристаллитная коррозия как фактор риска для работоспособности сварных соединений в условиях длительного срока службы оборудования молочной промышленности// Молочная промышленность. 2011. – № 7. – С. 47-49.
4. Слепцов О.И., Петров П.П., Ермаков Б.С. Исследование физико-механических основ создания высокопрочных и хладостойких сплавов Северного исполнения с применением местной комплексно-легированной РЗМ железо-марганцовой руды//Современные проблемы науки и образования. 2011. – № 9. – С. 51-58.
5. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты// Авиационные материалы и технологии.2014. – №2. – С.14-20.

УДК 539.21

ЛЕГИРОВАНИЕ ЛАНТАНОИДАМИ КРИСТАЛЛОВ $A^{III}B^{V}$

В.В. Романов[1], Б.С. Ермаков[1,3], В.А. Кожевников[1], К.Ф. Штельмах[2], С.А. Вологжанина[3]

1 – СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
3 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ermakov55@bk.ru

Аннотация
Состояние редкоземельных примесей при концентрациях порядка 10^{18} $см^{-3}$ в полупроводниковых кристаллах $A^{III}B^{V}$, легированных по объему, может быть описано в рамках модели квазимолекулярных редкоземельных центров типа Ln_2O_3 и областей спонтанной поляризации – связанных спин-поляронов, локализованных на мелких донорах.

Ключевые слова
Лантаноиды, намагниченность, квазимолекулярные редкоземельные центры, спин-поляроны, внутрицентровая люминесценция

Введение

Интерес к лантаноидам в качестве легирующей примеси полупроводниковых кристаллов обусловлен их яркими физико-химическими свойствами. Например, в некоторых работах показано, что благодаря высокой химической активности редкоземельных элементов возможно образование в германии и кремнии металлических скоплений, представляющих собой кластеры, служащие для радиационных дефектов эффективными стоками [1, 2]. Кроме того, введение редкоземельных примесей может быть использовано для «очистки» кристаллов путем связывания неконтролируемых примесей. Однако этим не исчерпывается возможность использования редкоземельных примесей при легировании кристаллов. По-видимому, не менее интересной, является возможность применения лантаноидов для создания новых оптических материалов на основе полупроводников, легированных редкими землями, которые характеризуются уникальными свойствами, обусловленными строением электронной оболочки редкоземельных атомов.

Вследствие высокой химической активности элементов группы лантаноидов актуальным является вопрос о состоянии атомов редкоземельных элементов, введенных в полупроводниковые кристаллы, и их распределении по кристаллу.

Электрические и оптические свойства полупроводниковых материалов, обусловленные примесными и собственными дефектами и представляющие наибольший интерес при создании приборов твердотельной электроники, неразрывно связаны с их магнитными свойствами. Последние наиболее адекватно отражаются в поведении магнитного момента, которое можно надежно контролировать по температурным зависимостям намагниченности исследуемых образцов.

В настоящей работе мы обсуждаем поведение редкоземельных примесей в легированных по объему кристаллах $A^{III}B^{V}$, выращенных методами Чохральского, Бриджмена и растворно-расплавным методом. Легирование происходило в процессе выращивания путем введения в расплав редкоземельного металла. Концентрация вводимой примеси составляла порядка 10^{18} $см^{-3}$ и контролировалась методами спектрального и нейтронно-активационного анализа [3].

Методы

Измерения температурных зависимостей намагниченности в интервале температур от 3,2 до 300 К при напряженности внешнего магнитного поля до 15 кЭ проводились методом Фарадея на специальной установке, которая была создана на базе спектрометра MGD 312 FG. Образцы помещались во внешнее магнитное поле в кварцевой чашечке, подвешенной на тонкой кварцевой нити. Регистрацию интенсивности «взаимодействия с магнитным полем производили в условиях, когда образец достигал состояния термодинамического равновесия, Контроль этого состояния проводили с помощью автоматизированной системы управления измерениями со специально разработанным программным обеспечением. Калибровку установки проводили с помощью эталонного образца, в качестве которого использовали монокристалл магнитно-чистого фосфида индия с восприимчивостью $\chi = -313 \cdot 10^{-9}$ cm^3/g. Массу образца определяли на весах BP 211 D с точностью до 10^{-5} g» [1].

Результаты и обсуждение

Исследования состояний редкоземельных примесей, выполненные в [4, 5], показали принципиальную возможность образования твердых растворов замещения со статистически распределенными по кристаллу одиночными лантаноидами в зарядовом состоянии Ln (III). Однако успех был весьма ограниченным – из всего ряда лантаноидов удалось надежно зарегистрировать спектры ЭПР лишь двух земель – иттербия и гадолиния. Кроме того, в работе [6] наблюдали спектр эрбия на кристаллах, легированных методом ионной имплантации, который был интерпретирован как тетраэдрический со слабым аксиальным искажением.

Все попытки обнаружить одиночные примесные центры других редкоземельных элементов из исследований спектров ЭПР и температурных зависимостей намагниченности не привели к успеху.

Наиболее очевидное объяснение полученных результатов исследований, по-видимому, заключается в значительном превышении ионных радиусов атомов лантаноидов радиуса замещаемого катиона [7]. Известный эффект лантаноидного сжатия [7] позволяет объяснить, почему удалось достичь успеха именно при использовании «тяжелых» редкоземельных элементов – их размер вследствие упомянутого эффекта приближается к ионному радиусу катиона решетки полупроводника.

Однако дальнейшие исследования, проведенные с кристаллами, легированными «тяжелыми» лантаноидами, обнаружили нестабильность полученных твердых растворов – их распад. Как и следовало ожидать, наиболее «долгоживущим» оказался легированный иттербием образец.

Так, например, зарегистрированный при температурах $T < 4{,}5K$ непосредственно после синтеза образца InP<Yb> спектр ЭПР, идентифицировавший тетрагональный центр иттербия [4], не удалось воспроизвести по прошествии полугода.

Еще меньший «срок жизни» был отведен твердому раствору гадолиния в фосфиде индия, спектр ЭПР которого записывался на установке ER-220D в интервале температур от 3 до 300К и демонстрировал близкую к идеальной угловую зависимость одиночного центра гадолиния в состоянии $^8S_{7/2}$. Распад твердого раствора InP<Gd> с концентрацией редкоземельной примеси $4 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ происходил в течение месяца.

Таким образом твердые растворы лантаноидов, содержащие редкие земли в качестве примесей замещения в катионных узлах решетки кристаллов $A^{III}B^{V}$, за сравнительно короткий промежуток времени полностью теряли свои исходные свойства.

Все попытки обнаружить одиночные примесные центры лантаноидов в кристаллах $A^{III}B^{V}$, легированных редкоземельными элементами, за исключением Yb, Er

и Gd, по измерениям температурной зависимости статической магнитной восприимчивости и методом ЭПР, окончились неудачей [3].

Дальнейшие исследования показали, что температурные зависимости статической магнитной восприимчивости кристаллов $A^{III}B^{V}$, содержащих лантаноиды, за исключением, может быть, европия, в термодинамически равновесных состояниях исследуемых материалов получают адекватное описание, если принять, что редкоземельные примеси формируют в кристалле систему слабовзаимодействующих квазимолекул типа Ln_2O_3 – квазимолекулярных центров, в которых между атомами редкоземельных элементов возникают обменные взаимодействия [3]. Предложенная модель соответствует характеру температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости в широком температурном интервале, демонстрирующих практически полное отсутствие зависимости от напряженности внешнего магнитного поля.

На конкурентной основе наряду с слабовзаимодействующими квазимолекулами могут формироваться «области спонтанной поляризации – связанные спин-поляроны» [1, 8 – 10]. Формирование спин-поляронов происходит, когда десять и более квазимолекул попадет в орбиту мелкого донора, Такое становится возможно при пониженных температурах и в области высоких локальных концентраций [1, 8, 14] редкоземельных элементов (см. рис. 1).

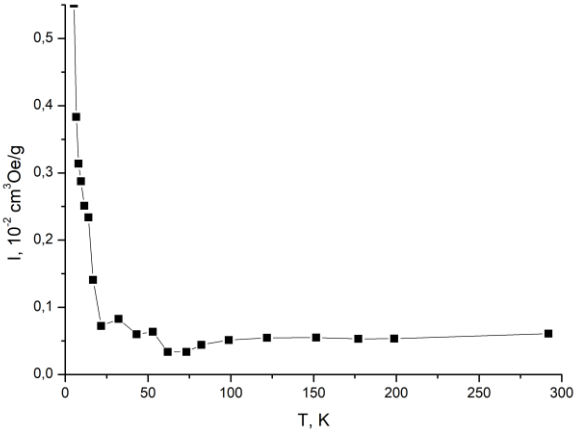


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности кристаллов InP< Er > с высокой концентрацией эрбия, демонстрирующая магнитные аномалии, обусловленные ферроупорядочением квазимолекулярных центров

Тем не менее, даже в составе квазимолекулярных редкоземельных центров из-за уникального строения магнитная 4f–оболочка редкоземельного иона, экранированная 5s и 5p–электронами, слабо искажается (расщепляется) электрическим полем лигандов. Это позволяет проводить наблюдение за процессами внутрицентровой люминесценции благодаря наличию эффективного канала возбуждения и поглощения практически в любых матрицах, т.к. влияние последней будет сравнительно слабым [2, 8]. При этом спектры внутрицентровой люминесценции будут сформированы совокупностью узких линий (~ 10 Å), вследствие того, что основные состояния редкоземельных примесей будет практически не гибридизированы с зонными состояниями кристалла, а возбужденные - гибридизированы слабо [2, 4, 6, 11 – 13].

В то же время дальнейшее повышение концентрации вводимой редкоземельной примеси существенно изменяет ситуацию, демонстрируя химическую активность редких земель и приводя к образованию в исследуемых кристаллах «включений второй фазы», которые удалось идентифицировать по характерным температурам фазовых магнитных переходов.

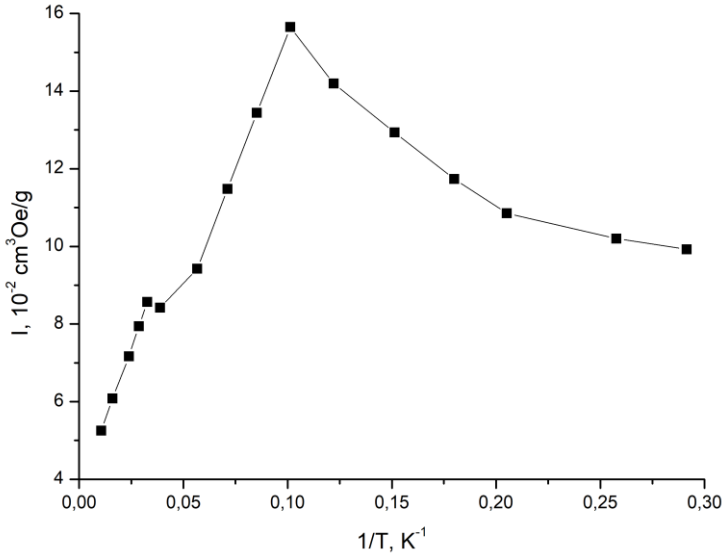


Рис. 2. Температурная зависимость намагниченности кристаллов InP<Nd>, содержащих «включения второй фазы»

На приведенных температурных зависимостях намагниченности кристаллов фосфидов индия, легированных неодимом (рис. 2), отчетливо наблюдаются характерные особенности, которые могут быть обусловлены сильномагнитными «включениями второй фазы», с остаточными примесями и пниктидами, входящими в состав основной решетки, в данном случае с фосфором [1].

Особенности поведения редкоземельных примесей в низкоразмерных полупроводниковых структурах являются предметом отдельных исследований.

Литература

1. Баграев Н.Т., Романов В.В. ФТП, 39(10), 1173, 2005.
2. Андрианов Д.Г., Бочкарев Э.П., Гришин В.П., Карпов Ю.А. ФТП, 12,511, 1978.
3. Романов В.В. Магнитные свойства метастабильных дефектов в полупроводниковых стеклаъ, кристаллах и наноструктурах: дисс. … доктора физико-математических наук: 01.04.07. Санкт-Петербург, 2002.
4. Курдюков Д.А., Певцов А.Б., Смирнов А.Н. и др. ФТТ, 58 (6), 2016. С.1176-1182.
5. Мастеров В.Ф., Романов В.В., Штельмах К.Ф. ФТТ, 25(5), 1435, 1983.
6. Мастеров В.Ф., Романов В.В., Саморуков Б.Е., Штельмах К.Ф. ФТП, 17(5), 948, 1983.
7. Ennen H., Schneider J., Pomrenke G., Axmann A. Appl. Phys. Lett., 43,943,1983.
8. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных соединений. М., Мир, 1974.
9. Bagraev N.T., Romanov V.V. Proceedings of SPIE, 4627, 84, 2002.
10. Баграев Н.Т.. Изв.АН СССР. Сер. физ., 47, 2331, 1983.
11. Нагаев Э.Л. Физика магнитных полупроводников. М., Наука, 1979.
12. Ennen H., Kaufmann U., Pomrenke G., Schneider J., Windscheif J., Axmann A.J. of Crystal Growth, 64, 165, 1983.
13. Касаткин В.А., Савельев В.П. ФТП, 18(9), 1634.
14. Wagner J., Ennen H., Muller H.D. J. Appl. Phys., 59(4), 1202, 1986.

УДК 621.791.753.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТОСПОСОБНОСТИ ХЛАДОСТОЙКОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К70 (Х90)

Е.И. Пряхин, Д.М. Шарапова

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

mhti@spmi.ru

Аннотация
Представлены результаты исследований стали класса прочности К70 (Х90). Произведена градация исследованных полуфабрикатов по их ремонтоспособности (количество допускаемых локальных повторных нагревов материала изделий при ремонте). Градация произведена из условия снижения вязкости металла в зоне перегрева, определяемая величиной работы удара образцов Шарпи при минус 40°С.
Ключевые слова
Низколегированная высокопрочная сталь, электродуговые технологии, ремонт деталей, зона термического влияния.

Промышленное освоение арктического шельфа требует широкого внедрения труб из хладостойких сталей более высоких классов прочности К65 (Х80) – К70 (Х90) взамен применяемых сталей категории прочности до К60 (Х70) [1 – 3] для дальнейшего роста эффективности эксплуатации трубопроводов.

При разработке трубных сталей, как правило, учитывают, что материал должен содержать относительно невысокое содержание углерода, дополнительно используют рациональное микролегирование, обеспечивают высокую чистоту металла по сере и фосфору (S≤0.001%, P≤0.010), а, кроме того, используют термомеханическую прокатку [4]. Таким образом для трубных стаей класса прочности Х80-Х90 необходимо обеспечить требуемый химический состав [5].

Так как сварочные технологии относятся к самым распространенным во всех отраслях машиностроения и повсеместно используются при ремонтных работах, то изучение тепловой обстановки при ремонте является наиболее востребованным и актуальным [6 – 8]. Опираясь на разработанные требования к сварным соединениям труб [9, 10], в процессе проектирования новых отечественных трубопроводов были заложены повышенные требования к работе удара металла сварных соединений при пониженных температурах. Для основного металла и сварного соединения нормируется работа удара при температуре испытания -40 °С (таб. 1).

Таблица 1

Требования к механическим свойствам труб класса прочности К70 (Х90)

$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т/\sigma_в$	A_5, %	KV^{-40}, среднее из 3х испытаний, Дж	KV^{-40}min, Дж
590-690	690-790	≤0,90	≥16	80	60
Требования к работе удара металла сварных соединений,					KV^{-40}, Дж
среднее значение из 3х испытаний					65
минимальное значение					47

Результаты динамических испытаний, проведенные при низких температурах образцов Шарпи, с надрезом в месте наложения друг на друга зон термического влияния, вырезанных из штатных деталей сварных соединений из стали класса прочности К70 (Х90) различных производителей, показали, что имеют место выпады до 37Дж, что несколько ниже нормативных требований (KV_{min}= 47Дж при температуре испытаний минус 40^0С). Следует отметить, что на этих деталях выпады по работе удара ниже допустимого уровня в местах однократного теплового воздействия не отмечаются.

Целью работы была оценка ремонтоспособности стали класса прочности К70 (Х90) применительно к электродуговым технологиям устранения дефектов в процессе производства труб и при строительстве магистральных трубопроводов. Вопрос деградации свойств сталей в ЗТВ при ремонтных работах, предполагающих локальный нагрев, и нередко включающих повторные технологические нагревы, является актуальным, так как работоспособность материала в изделии определяет его чувствительность к кратковременным нагревам [12].

Экспериментальная часть работы проводилась на полуфабрикатах стали класса прочности К70 (Х90) с пределом текучести от $\sigma_т \geq 590$ и до $\sigma_т \geq 690$ МПа.

Все взятые для исследования пробы из были одинакового размера – пластины 1200х500х20мм. Поверхность проб зачищалась до металлического блеска. Затем механически строгалась канавка на 2/3 толщины пробы с углом раскрытия 60° (разделка) вдоль продольной оси пробы. Всю поверхность проб, в том числе разделке, подвергались обработке этиловым спиртом для обезжиривания.

Далее проводили подготовительный нагрев на 2-х дуговом автомате ESAB Master A6 при максимальной погонной энергии (5 кДж/мм). Выпуклость наплавленного валика механически удаляли заподлицо с основным металлом после остывания. Чтобы выявить линию сплавления, проводили травление поверхности в 15%-ном водном растворе персульфата аммония [12].

Последующие проходы, которые имитировали повторные нагревы, выполняемые при ремонтных работах, проводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. В процессе многократных нагревов контролировалась температура между каждым проходом, которая не должна была превышать 150°С.

Для исключения теплового воздействия от последующих на предыдущие проходы, готовые к исследованию участки проб отрезали гидроабразивным способом и передавали на изготовление образцов Шарпи. Эту операцию повторяли после 2-х, 3-х, 5-ти и 10-ти проходов в соответствии со схемой на рис. 1.

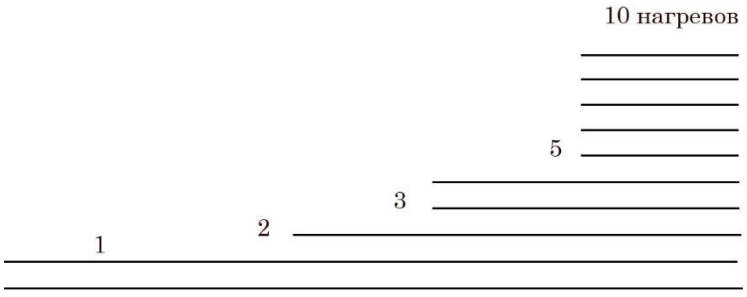


Рис. 1. Схема выполнения многократных проходов источника теплоты на пробе

Для испытаний на динамический изгиб использовали маятниковый копр Walter+Bai PH-450J с энергией удара 450 Дж. Согласно DNV OS-F-101 определяли вязкость металла в ЗТВ на поперечных образцах с V- образным надрезом. Температура испытания была минус 60°С. Нанесение надреза в образцах осуществлялось в перпендикулярном направлении к поверхности пластин.

Результаты исследований тепловых процессов на деталях толщиной от 20 до 40 мм [9-10] позволили установить, что максимальное значение Δ_{max} (от поверхности на расстоянии 1/2 глубины проплавления) и минимальное (в корне шва) Δ_{min} (мм) размера ЗТВ при оптимальной технологии находятся в зависимости от погонной энергии $Q_п$ (кДж/мм) [12]:

$$\Delta_{max} = 0{,}79Q_п + 0{,}9 \quad (1.2)$$

$$\Delta_{min} = 0{,}15Q_п + 1{,}1 \quad (1.3)$$

Максимальное значение размера δ_{max} в абсолютных величинах составляет от 3,0 мм до 7,5 мм, а минимальное – находится в пределах от 1,5 мм до 2,5 мм [12].

Таким образом, при многократных ремонтах электрической дугой материала, сопровождаемых повторными нагревами в зоне ремонта, наложение участков перегрева друг на друга практически неизбежно.

Полученные данные показывают, что исследованные стали класса прочности К70(Х90) должны иметь соответствующие ограничения на технологии ремонта, основанные на нагревах электрической дугой. Причем, такие ограничения должны ужесточаться с ростом прочности стали (см. рис. 2 результаты испытаний образцов из стали с пределом текучести ≥ 630 МПа).

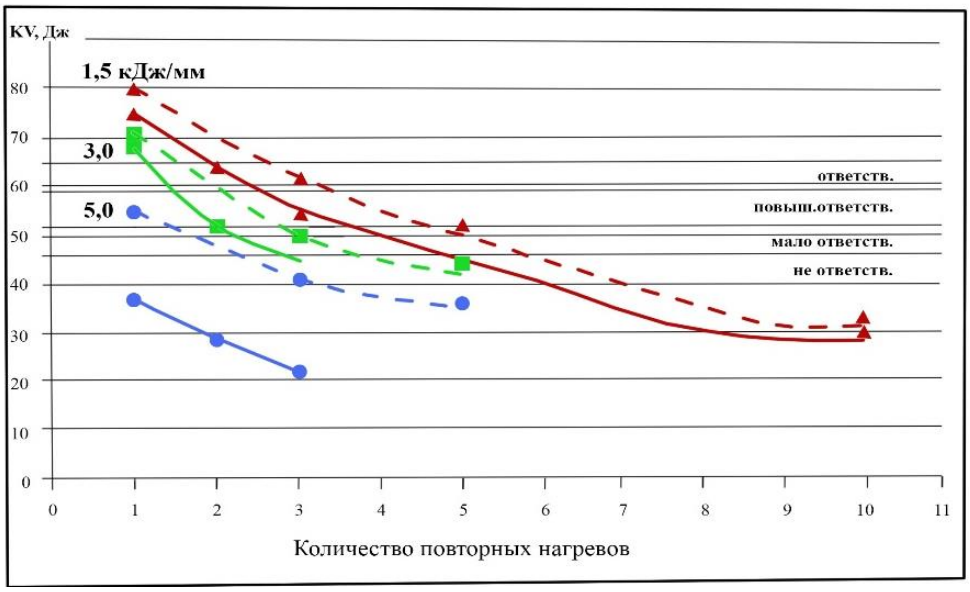


Рис. 2. Минимальные значения работы удара металла на участке крупного зерна ЗТВ (нижние огибающие) в зависимости от количества повторных нагревов и величины вводимой погонной энергии

На основании полученных результатов стало возможно осуществить градацию исследованных проб по их ремонтоспособности, а именно по количеству допустимых повторных локальных нагревов материала изделий, осуществляемых при ремонтных работах (см. таб. 2).

Градацию проводили с учетом того, что вязкость металла в зоне перегрева (в зоне крупного зерна), определяемая средним значением работы удара [KV], должна удовлетворять представленным требованиям, в зависимости от регламентирующего нормативной документацией минимального уровня значений:

– для ответственных деталей ≥ 0,9 [KV];

– для деталей повышенной ответственности ≥ 0,8 [KV];

– для малоответственных деталей ≥ 0,7 [KV];
– для неответственных деталей KV не регламентируется [12].

Таблица 2

Количество допускаемых повторных локальных ремонтных нагревов деталей из полуфабрикатов стали К70 (Х90) разного уровня прочности

Класс прочности	Предел текучести	Ремонтоспособность материала		
	МПа	Мало ответственнные детали	Детали повышенной ответственности	Ответственные детали
К70 (Х90)	≥ 590	Ограничено не более 5 нагревов	Ограниченно не более 3 нагревов	Ограничено не более 2 нагревов
	≥ 630	Ограничено не более 3 нагрева	Ограничено не более 2 нагревов	ограниченл не более 1 нагревов

Таким образом, результаты исследований ремонтоспособности стали класса прочности К70 (Х90) позволили установить, что следует в максимальной степени уменьшать величину тепловой энергии, вводимой в деталь, позволяя снизить уровень деградации металла в зоне крупного зерна на участке перегрева при повторных локальных термических воздействиях в процессе ремонта. При использовании традиционных источников нагрева, таких как дуга, можно рекомендовать применять оборудование и технологии с цифровым управлением процессами нагрева и переноса металла.

Результаты настоящего исследования подтверждают ввод ограниченной свариваемости низколегированной стали для магистральных трубопроводов [11].

Кроме снижения погонной энергии, чтобы предотвратить наложение участков перегрева при повторных нагревах, возможно использование еще одного технологического приема. В этом случае при проведении повторных нагревов необходимо учесть, что относительно участка крупного зерна ЗТВ, сформированного от предыдущего нагрева, источник нагрева необходимо смещать. Если этого не предусмотреть, неизбежной будет деградация свойств на таком участке до недопустимого уровня. Осуществление этого процесса с технологической точки зрения не представляет проблем. Для этого при удалении дефекта необходимо стенки выборки смещать на значение, равное толщине участка перегрева или несколько больше, относительно предыдущей выборки в направлении основного металла [12].

Литература

1. Piirainen V.Y., Estrin Y. New Approach to Road Construction in Oil-Producing Regions of Western Siberia //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 87(7), 2017.
2. Bannenberg N. Recent developments in steelmaking and casting // Niobium science and technology, Proc. Int. Symposium on Niobium, Orlando, Florida, Dec. 2–5, 2001.
3. Голованенко С.А. Новые стали и технологические схемы производства толстого листа для газопроводных труб большого диаметра // Металлы, №5, 2002, С. 36-46.
4. Hamada M. Control of strength and toughness at the heat affected zone // Welding international, No.17 (4), 2003, 265-270.
5. Немтинов А.А., Корчагин А.М., Попков А.Г., Хлусова Е.И., Орлов В.В. Освоение производства штрипса К70 для труб большого диаметра на стане 5000 // Металлург, 2008, №11, С. 61-67.

6. Кирьян В.И., Миходуй Л.И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях.//Автоматическая сварка № 3. 2002. С. 10-17.
7. Hillenbrand H.-G., Gras M., Kalwa C. Development and production of high strength pipeline steels // Niobium science and technology, Proc. Int. Symposium on Niobium, Orlando, Florida, Dec. 2–5, 2001.
8. Shi Y., Han Z. Effect of weld thermal cycle on microstructure and fracture toughness of simulated heat-affected zone for a 800 MPa grade high strength low alloy steel // J. Mater. Proc. Technol., 207, 2008, pp.30-39.
9. Meimeth S., Grimpe F., Meuser H. Development, state of the art and future trends in design and production of heavy plates in X80 steel grades// Steel Rolling 2006, 9th intermationsl & 4th European Conferences. Paris, France, June 19-21, 2006.
10. Величко А.А., Борцов А.Н., Шабалов И.П., Франтов И.И., Уткин И.Ю. Взаимосвязь тепловых процессов с морфологией сварных соединений и перспективные виды сварки применительно к толстостенным электросварным трубам. // Металлург, № 3, 2014. С.72-77.
11. Пряхин Е.И., Шарапова Д.М., Шарапов М.Г. Технологическая свариваемость низколегированных сталей при сварке под флюсом на высоких погонных энергиях - //Сварочное производство №4, 2016. С. 3 – 15.
12. Шарапова Д.М. Эволюция структуры и свойств конструкционных низколегированных сталей при кратковременных локальных термических воздействиях концентрированными источниками тепла. [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.16.09: защищена 16.02.19. – Санкт-Петербург, 2018. – 140 с.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664-436.1

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СЕГРЕГИРОВАННЫХ ПОТОКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНСТАНТИРОВАННЫХ НАПИТКОВ

К.Б. Плотников[1], А.М. Попов[1], И.Б. Плотников[1], И.О. Плотникова[2]

1 – Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия
2 – Кемеровский коммунально-строительный техникум им. В.И. Заузелкова, г. Кемерово, Россия

k.b.plotnikov.rf@gmail.com

Аннотация
В результате проведенных исследований процесса агломерирования в барабанных грануляторах с наложением вибрационного поля с целью создания сегрегированных потоков были установлены экспериментально-статистические модели, описывающие процесс гранулирования и удельных энергозатрат.
Ключевые слова
Гранулирование, сегрегированный поток, инстантированный продукт.

Одной из ключевых задач для каждого государства – обеспечение населения полезным и здоровым питанием, а также решение проблемы продовольственной безопасности. В продуктах растительного происхождения находится колоссальное количество необходимых для организма веществ [1]. В Сибирском регионе ягодные культуры являются наиболее перспективными по сравнению с плодовыми, т.к. распространение плодовых растений сильно ограничено районированными сортами. Одним из способов решения проблемы является изготовление инстантированных гранулированных продуктов питания (ИГПП) с использованием плодово-ягодного сырья [2]. В наше время существует множество способов и методов гранулирования, имеющих свои преимущества и недостатки. На большинстве предприятий используется процесс структурообразования методом окатывания, что влечет за собой получение не стабильного гранулометрического состава. В последние годы все чаще находят применение аппараты, включающие в себя несколько различных способов гранулирования, например, агломерирование окатыванием с подводом динамической нагрузки, поскольку их использование позволяет создать компактное и экономически обоснованное машинно - аппаратурное оформление процесса гранулирования [3]. Актуальным направлением на пути совершенствования процесса структурообразования и повышения эффективности существующих машин является твердофазная механическая активация исходного сырья. Применение в совокупности этих методов может позволить получить ИГПП с более высокими органолептическими и структурно механическими свойствами готового продукта [4]. Однако, данные машины недостаточно изучены с точки зрения получаемого гранулометрического состава и удельных энергозатрат.

В результате анализа литературно-патентного обзора была предложена новая конструкция барабанного виброгранулятора (БВГ) (номер заявки № 2017 1452621 05 (077 495), дата поступления заявки 21.12.17), которая подверглась исследованию основных характеристик и сравнительному анализу с существующими моделями грануляторов на предмет конкурентоспособности. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1. Исследования проводились в барабанном виброгрануляторе (БВГ) аналогичной конструкции, изложенной в работе [5]. Методика определения дисперсного состава исходной сыпучей смеси подвергающейся гранулированию заключалась в следующем.

Основные геометрические параметры установки следующие: внутренний диаметр обечайки 0,144 м; длина рабочей части корпуса 1 м; диаметры входного и выходного патрубков для продукта – 0,050 м. Детали корпуса и рабочего органа (обечайка, фланцы, крышки, ленточная мешалка) с целью визуального наблюдения за ходом процесса структурообразования были изготовлены из plexiglas GS и plexiglas XT. Поскольку усилие на подшипники скольжения 12, 24 было не велико в этой связи последние изготавливались из фторопласта-4 обладающего высоким коэффициентом трения и способным работать без смазки при невысоких нагрузках и скоростях.

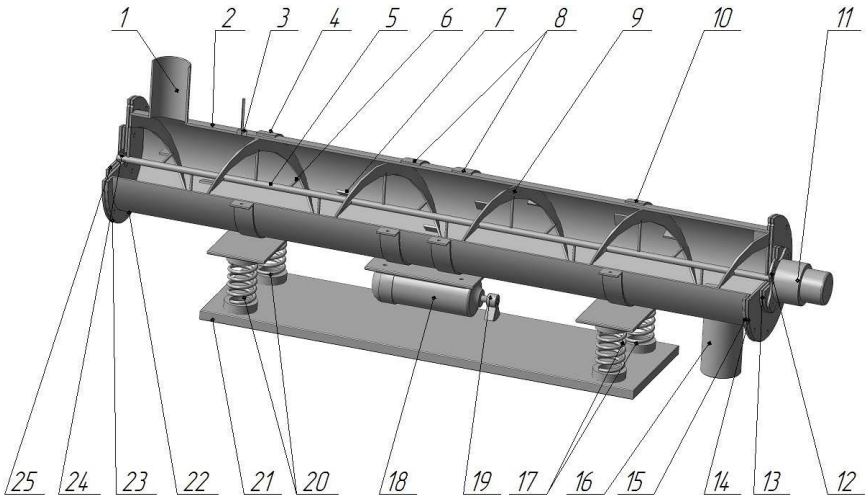


Рис. 1. Барабанный виброгранулятор: 1 –загрузочный патрубок; 2 – обечайка; 3 – форсунка; 4, 10 – хомут опоры; 5 – вал; 6 – стержень; 7 – лопатка; 8 – хомут опоры вибровозбудителя; 9 – ленточная мешалка; 11–двигатель привода ленточной мешалки; 12, 24 – подшипник скольжения; 13, 25 – крышка сквозная;14, 23 – крышка; 5, 22 – фланец; 16 – разгрузочный патрубок; 17, 20 – пружина сжатия; 18 – двигатель вибровозбудителя; 19 – дебаланс; 21 – основание

Сыпучая смесь до и после твердофазной механической активации проводилась микроскопическим методом с обработкой микрофотографий на ЭВМ в программе ImageTool v. 300. Сахар и высушенный жом измельчались на молотковой дробилке [6]. С целью изучения влияния твердофазной механической активации на процесс структурообразования гранул в разработанном БВГ картофельный крахмал подвергался измельчению в лабораторной мельнице МЛ-1 в течение 30 мин [7].

В качестве связующего раствора использовался концентрированный экстракт жимолости с различным содержанием сухих веществ. Физико-химические характеристики рабочих жидкостей определялись: плотность - пиктометрическим методом; вязкость – с использованием капиллярного вискозиметра типа ВПЖ-3 с погрешностью измерений ±0,3% по ГОСТ 10028-81; поверхностное натяжение – методом Ребиндера, наибольшего давления пузырьков [8], прочность получаемых гранул определяли на КП-3.

Для определения процесса агломерирования проводились определения гранулометрического состава по длине БВГ ситовым методом. Ситовой анализ применим для материалов с размерами частиц 10-0,04 мм, что соответствует шкале сит по ГОСТ 3584-73.

Анализ результатов исследований агломерирования гранул по длине БВГ. На рис. 2 видно, что процесс агломерирования по длине барабанного виброрегулятора имеет зависимость не только от угла наклона к горизонтальной плоскости, но и от режимных параметров. При малом угле наклона барабана на расстоянии 0,7 м по длине БВГ происходит срыв процесса грануляции в связи с образованием большого числа агломератов с последующим неконтролируемым структурообразованием. При угле наклона машины α > 7,5° наблюдается большое количество несформировавшихся гранул, что влечёт за собой повышению удельных затрат на дополнительную обработку продукта. Увеличение амплитуды и частоты колебаний оказывает меньшее воздействие на процесс агломерирования частиц, чем частота вращения ленточной мешалки, это связано с тем, что при увеличении частоты вращения, так же увеличивается время нахождения гранулируемого продукта в БВГ. Физико-химические свойства связующей жидкости, так же оказывают влияние на процесс агломерирования, при этом кинетическая вязкость оказывает наибольшее влияние. Для исключения срыва процесса агломерирования необходимо увеличивать частоту вращения ленточной мешалки и частоту колебаний при увеличении динамической вязкости связующего. Количество рабочей жидкости определяется предварительными сериями экспериментов.

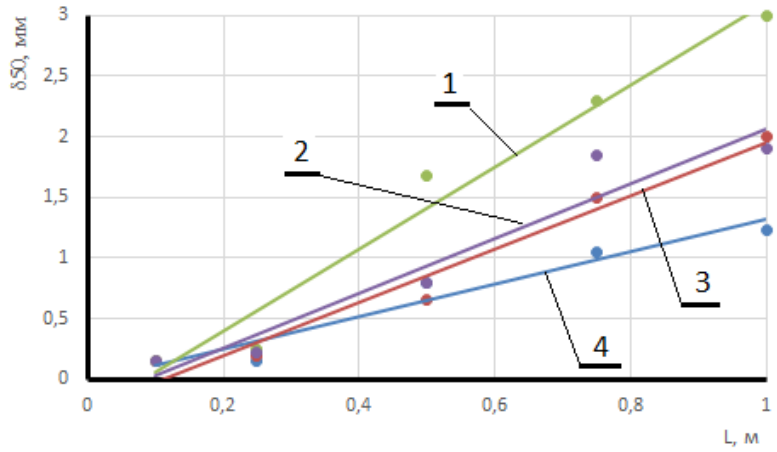


Рис. 2. Зависимость среднемедианного размера частиц от расстояния по длине БВГ отбора проб:
1 – α = 1°, n = 6 мин$^{-1}$; 2 - α = 3°, n = 6 мин$^{-1}$; 3 – α = 5°, n = 6 мин$^{-1}$; 4 – α = 3°, n = 7 мин$^{-1}$

На рис. 3 представлена гистограмма плотности распределения получаемых гранул по размерам. На рис. 3 можно увидеть, что отклонение гранулометрического состава от заданных параметров находится в пределах нормы (количество гранул в диапазоне от 0,5 до 3 мм, нормативное значение 98%, поле допуска ±2%).

В результате обработки полученных данных была получена экспериментально-статистическая модель:

$$\delta_{50} = 0{,}15 + 0{,}475 \cdot A + 0{,}08 \cdot n + 0{,}5 \cdot \nu + 0{,}06 \cdot \alpha - 55{,}3 \cdot \mu_{ж} \cdot \nu - 0{,}0042 \cdot \rho_{ж} \cdot A \quad (1)$$

где n – частота вращения ленточной мешалки, об/мин; A – амплитуда колебаний, мм; ν – частота колебаний, Гц; α – угол наклона БВГ, гр.; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость рабочей жидкости, Па·с; $\sigma_{ж}$ – поверхностное натяжение жидкости, Дж/м2; $\sigma_{г}$ – прочность гранул, МПа; δ50 – среднемедианный размер гранул, мм;

При R=0,95 применимость уравнений (1) подтверждена в следующих пределах: A=1-3 мм; n=3-12 об/мин; ν=20-50 Гц; α=2,5-6 °; $\rho_ж$=1014-1118 кг/м^3; $\mu_ж$=(1,03-2,91)·10^{-3}Па·с; $\sigma_ж$=(45,7-59,6)·10^{-3} Н/м.

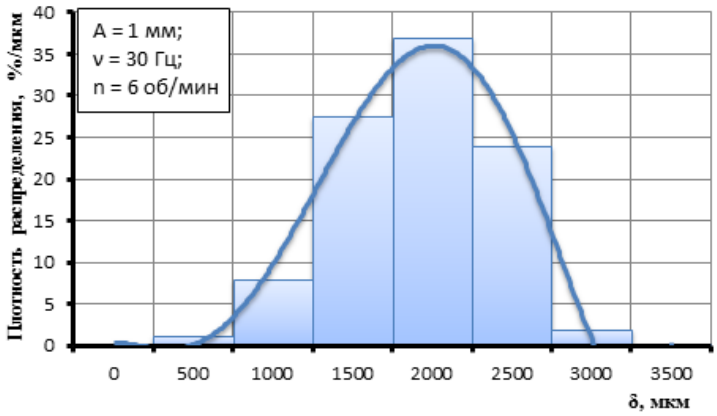


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности получаемых гранул

Сравнительный анализ затрат энергии на проведение непосредственно процесса гранулирования (подъем и опрокидывание гранул, окатывание гранул, сегрегацию сформированных частиц) условно обозначенных как «полезные затраты» и механических (потери энергии в подшипниках, соединительных муфтах, на трение мешалки о внутреннюю поверхность корпуса). В общем виде механические затраты энергии можно представить:

$$N_м=N_{КПД}+N_П, \quad (2)$$

Из графика (рис. 4) видно, что «полезные затраты» составляют не более 28% от механических, причем при увеличении частоты колебаний, амплитуды и частоты вращения мешалки «полезные затраты» снижаются до 22%. Физико-химические свойства рабочей жидкости оказывали сравнительно невысокое влияние на энергозатраты БВГ в целом и составляли порядка 0,3-1%.

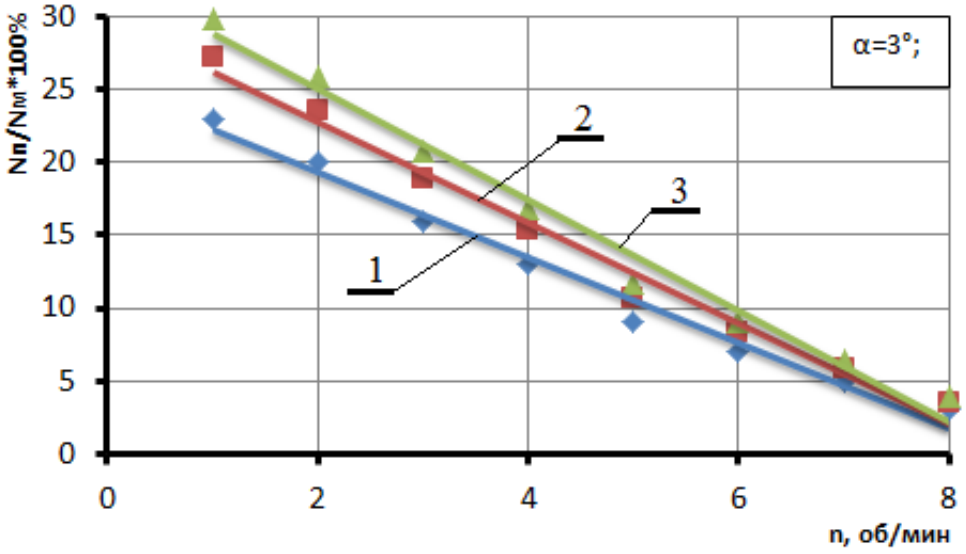


Рис. 4. Зависимость «полезных энергозатрат» от частоты вращения ленточной мешалки: 1 – A=1 мм, ν=30 Гц; 2 – A=1 мм, ν=50 Гц; 3 – A=3 мм, ν=20 Гц

Выходным параметром являлся механические затраты энергии $N_м$. Обработка экспериментальных данных по механическим затратам энергии позволила получить экспериментально – статистическую модель:

$$N_м = 49{,}5 + 9{,}63 \cdot A + 0{,}25 \cdot \vartheta + 8 \cdot n + 0{,}75 \cdot \alpha - 0{,}0001 \cdot \mu_ж - 1{,}4 \cdot \rho_ж - 0{,}1 \cdot A \cdot \vartheta + \\ + 0{,}74 \cdot A \cdot \alpha - 1{,}23 \cdot n \cdot \mu_ж \quad (3)$$

R=0,98. Анализируя уравнение (3) можно сделать вывод, что наибольшее влияние на механические энергозатраты оказывает частота и амплитуда колебаний и частота вращения мешалки. Параметры рабочей жидкости как видно из выражения не оказывают существенного влияния. В сравнении с остальными затратами энергии доля затрат на механическую работу составляют порядка 28% от общих энергозатрат на проведение процесса структурообразования. В этой связи с целью упрощения расчетов, при минимальных погрешностях можно порекомендовать использовать для расчетов полных энергозатрат уравнение (3) с прибавкой коэффициента на пусковой момент (0,25) и механическую работу (0,25). Тогда с преобразованиями полные затраты энергии с достаточной точностью можно определить по выражению:

$$N = 1{,}5 \cdot N_м \quad (4)$$

С целью оптимизации процесса структурообразования в новой конструкции БВГ использовался пакет анализа в системе Microsoft Excel по методике Ньютона. Результаты оптимизации сведены в таблицу. С целью проверки адекватности полученных значений были проведены серии экспериментов при этом значения варьируемых параметров были приняты согласно значениям, из таблицы.

Таблица

Рациональные параметры процесса

Параметр / Вид Крахмала	Амплитуда колебаний (A), мм	Частота колебаний (ν), Гц	Частота вращения мешалки (n), об/мин	Угол наклона БВГ (α), °	Плотность связующего раствора ($\rho_{ж}$), кг/м^3	Вязкость связующего раствора ($\mu_{ж}$), Па·с	Поверхностное натяжение связующего раствора ($\sigma_{ж}$), Н/м.	Среднемедианный размер	
								Теоретический,	Практический,
Механоактивированный	1	30	6	3	1063,2	$2{,}254 \cdot 10^{-3}$	$48{,}47 \cdot 10^{-3}$	2,0	2,13
Нативный	1	40	7	3	1063,2	$2{,}254 \cdot 10^{-3}$	$48{,}47 \cdot 10^{-3}$	2,06	2,19

Выводы

Установлены закономерности процесса агломерирования, и удельных энергозатрат в условиях твердофазной механической активации картофельного крахмала от основных конструктивных и режимных параметров процесса.

Литература

1. Короткий И.А. Сибирская ягода. Физико-химические основы технологий низкотемпературного консервирования: монография. – Кемерово. 2007. – 146 с.
2. Попов А.М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. – 324 с.
3. Варсонофьев В.В., Кольмах-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия, 1985. 240 с.
4. Дудкин М.С. Новые продукты питания / Дудкин М.С., Щелкунов Л.Ф. – М.: МАИК «Наука», 1998. – 304 с., ил.
5. Классен П.В. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
6. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. 143 с., ил.
7. Жилякова Е.Т. Твердофазная механохимическая обработка – перспективный метод модификации крахмалов для фармацевтической промышленности / Жилякова Е.Т., Новикова М.Ю., Попов Н.Н., Придачина Д.В., Бондарев А.В. – Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – С. 28-33.
8. Езерский М.Л. Методы определения технологических характеристик фармацевтических порошков. II. Насыпной вес, объемная плотность, сыпучесть, угол откоса, слипаемость, сопротивление сдвигу/ Езерский М.Л. // Химико-фармацевтический журнал. – 1977. – № 8. – С. 98-114.

УДК 637.03, 664, 602.1

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В.А. Балюбаш, С.Е. Алёшичев, Е.А. Травина, В.Л. Иванов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

balubash.v@gmail.com, sergspbcprf@rambler.ru, tea-922@mail.ru, vniig-audit@mail.ru

Аннотация

Исследование относится к способам управления многофакторными объектами пищевых производств, представляющих собой многообразные формы аппаратурно-технологических процессов, протекающих в непрерывных, непрерывно-дискретных и дискретных режимах. Это особенно актуально для комплексов пищевых производств с последовательным включением технологических звеньев, разделенных аппаратурно-технологическими емкостями и сопротивлениями. Для таких звеньев характерен переходной вид запаздывания, значительно превышающий величину запаздывания в одноемкостных объектах.

Предложенное решение – применение двухконтурных систем автоматического регулирования, способно обеспечить повышение качественных показателей систем управления в объектах химико-технологических процессов. Двухконтурную систему автоматического регулирования целесообразно применять в том случае, когда регулируемый объект подвергается частым возмущающим воздействиям со стороны регулирующего органа и имеется параметр с малой инерционностью. При этом внутренний контур регулирования подавляет возникающие внутренние возмущения, обусловленные спецификой самого технологического процесса, а внешний контур реагирует на возмущающие воздействия, поступающие извне, например, с изменением свойств поступающего сырья.

Ключевые слова

Технологический процесс, многофакторные объекты, пищевые производства, многоконтурные системы, управление.

Производство пищевых продуктов, как сложной для управления системы, представляет собой различные виды и формы технологических процессов, протекающих в дискретных, непрерывных, а также непрерывно-дискретных режимах. Например, последовательное подключение отдельных аппаратов с отличающимися качественными параметрами сырья, обусловленными процессами биотехнологической подготовки продукта, приводит к появлению скачкообразных возмущений, представляющих собой одну из наиболее тяжелых форм возмущающих воздействий в системах управления. Следует также отметить, что при последовательном включении технологических звеньев, разделенных аппаратурно-технологическими емкостями и сопротивлениями, формируется емкостной или переходной вид запаздывания, который в совокупности с «чистым» (транспортным) запаздыванием значительно превышает величину запаздывания в одноемкостных объектах.

Выбор структуры систем управления аппаратурно-технологическими комплексами (АТК) пищевых производств обусловлен необходимостью учета специфики технологической и аппаратурной организации АТК, жестко связанной с нормированным временем переработки отдельных видов пищевого сырья, его

переменными свойствами и составом, высокими требованиями к качественным показателям готового продукта [1]. При этом современные высокопроизводительные АТК несут в себе повышенный риск значительных потерь, связанных с возможным исправлением брака готовой продукции.

Применяемые в современных АТК производства пищевых продуктов одноконтурные системы управления не всегда способны обеспечить требуемые качественные показатели готового продукта.

Выбор многоконтурной системы управления для многофакторных АТК производства пищевых продуктов является предпочтительным, учитывая аппаратурное и технологическое совмещение процессов, выполняющих полный цикл операций, взаимосвязанных с качественными показателями готового продукта [2]. Повышение качественных показателей переходных процессов регулирования в этом случае обеспечивается снижением времени запаздывания по каналам систем регулирования и повышением уровня регулирующих воздействий при совмещении каналов управления, взаимосвязанных с выходными параметрами объекта [3].

На рис. 1 приведена структурно-параметрическая схема АТК производства сливочного масла, включающая внешние и внутренние факторы [4]. К внешним факторам относятся сливки, являющиеся сырьем для производства сливочного масла, которые проходят операции предварительной технологической подготовки, потенциально обеспечивающей влияние на процесс сбивания сливочного масла и его влагосодержание. К внутренним факторам относятся операции аппаратурного формирования перевода поступающих сливок в сливочное масло с обеспечением заданного уровня влагосодержания [5]. Одним из основных источников возмущающих воздействий являются сливки, поступающие в маслоизготовитель. Это связано с тем, что на стадии созревания сливок технологические факторы – температура созревания сливок и содержание жира в сливках, оказывающие значительное влияние на формирование влажности сливочного масла, как правило, неуправляемы и при подключении очередного сливкосозревательного резервуара их значения могут отличаться, поскольку возникающие при этом возмущения носят ступенчатый характер [6].

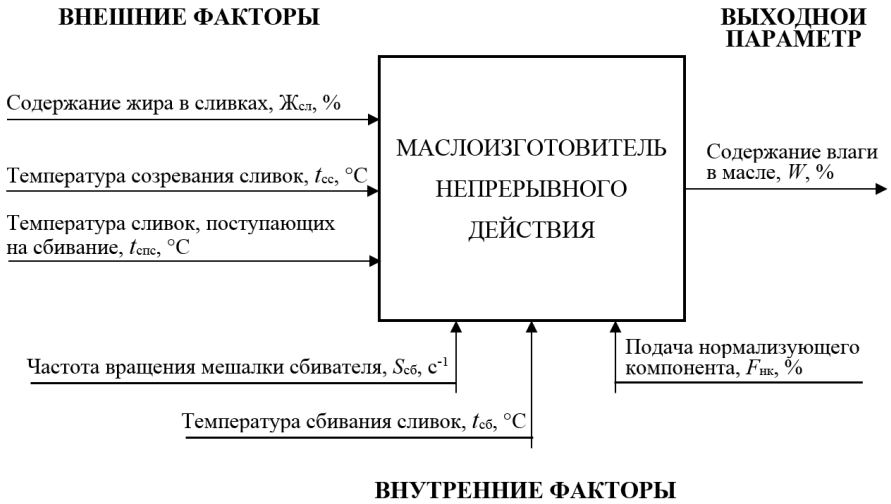


Рис. 1. Структурно-параметрическая схема производства сливочного масла в маслоизготовителе непрерывного действия

Факторами, наиболее значимыми по уровню влияния на формирование влажности готового продукта на стадии маслоизготовления, приняты температура

сливок, поступающих на сбивание, частота вращения мешалки сбивателя и подача нормализующего компонента. В структуре маслоизготовителя управляемость этих факторов обеспечена аппаратурно. При этом использование различных сочетаний управляющих факторов может быть применимо для обеспечения синхронизации режимов технологического процесса в маслоизготовителе [7].

Для определения уровня влияния технологических и аппаратурных факторов процесса на 1,0% изменения влажности сливочного масла предложен коэффициент формирования влажности (коэффициент передачи), рассчитываемый по формуле

$$K_B = \frac{\Delta W}{\Delta S}, \qquad (1)$$

где $K_в$ – коэффициент формирования влажности, % влажности/ ед.измерения фактора;
ΔW – изменение содержания влаги в масле, %;
ΔS – изменение фактора, ед. измерения фактора.

Результаты анализа уровней влияния аппаратурно-технологических факторов на 1,0% изменения содержания влаги в сливочном масле в технологически разрешенных пределах приведены в таблице.

Материалы анализа аппаратурно-технологических факторов в процессе производства сливочного масла позволяют определить вариант суммарного влияния неуправляемых факторов, как возмущающее воздействие. При этом отклонение двух факторов – содержания жира в сливках и температуры созревания сливок в пределах всего технологически разрешенного диапазона может привести к суммарному отклонению влажности масла на выходе до ±4,0%. Такой вариант характерен для переходного режима работы маслоизготовителя, связанного с подключением очередного сливкосозревательного резервуара и обусловленного возникновением возмущающих воздействий ступенчатого характера, что значительно усложняет стабилизацию влагосодержания готового продукта [8].

Как показывают результаты анализа, в таком случае суммарное управляющее воздействие трех факторов – температуры сливок, поступающих на сбивание, частоты вращения мешалки сбивателя и подачи нормализующего компонента, потенциально

Таблица

Уровни влияния факторов на 1% изменения содержание влаги в масле в технологически разрешенных пределах

Факторы формирования параметра влажности		Технологически разрешенный диапазон изменения фактора	Возможное отклонение влажности масла, %	Коэффициент формирования влажности (коэффициент передачи), $K_в$
внешние	Содержание жира сливок, поступающих на сбивание, %	38 – 45	5,6	0,8
	Температура созревания сливок, °С	4 – 7	2,6	0,9
	Температура сливок, поступающих на сбивание, °С	8 - 14	15,0	2,5
внутрен-ние	Частота вращения мешалки сбивателя, $с^{-1}$	17,4 - 30,0	13,6	1,0
	Подача нормализующего компонента, %	0 - 2	2,0	1,0

может быть использовано для стабилизации влажности масла, так как уровень их суммарного воздействия превышает уровень воздействия неуправляемых факторов.

Предложенное решение позволяет оперативно компенсировать отклонение влажности готового продукта, вызванное возмущающим воздействием, как в эксплуатационном, так и в переходном режимах работы маслоизготовителя.

Анализа материалов аппаратурно-технологических решений позволяет обосновать выбор управляемых и неуправляемых факторов процесса, установить уровень их влияния на формирование влажности готового продукта, а также вид и характер возмущающих воздействий на стадиях созревания сливок и маслоизготовления. Учитывая многофакторность процесса формирования влажности сливочного масла, наличие внешних возмущающих воздействий скачкообразного характера и системного запаздывания аппаратурно-технологической системы «сливкосозревательный резервуар – маслоизготовитель», предложена структура многоканального управления, предусматривающая внесение управляющих воздействий по величине текущего значения влагосодержания сливочного масла на выходе маслоизготовителя с предвычислением потенциально ожидаемого отклонения влажности готового продукта [9]. Структура многоканального управления процессом производства сливочного масла представлена на рис. 2.

В эксплуатационном режиме управления при подключении очередного резервуара к пмаслоизготовителю, поступление сливок предусмотрено через теплообменный аппарат, в котором стабилизируется их заданный уровень температуры при поступлении в маслоизготовитель. При этом дополнительно обеспечивается допустимый перепад температур 3-4 ºС внутри сбивателя маслоизготовителя [10]. На отмеченных двух этапах управление температурными режимами сливок обеспечивают отдельные самостоятельные контуры регулирования.

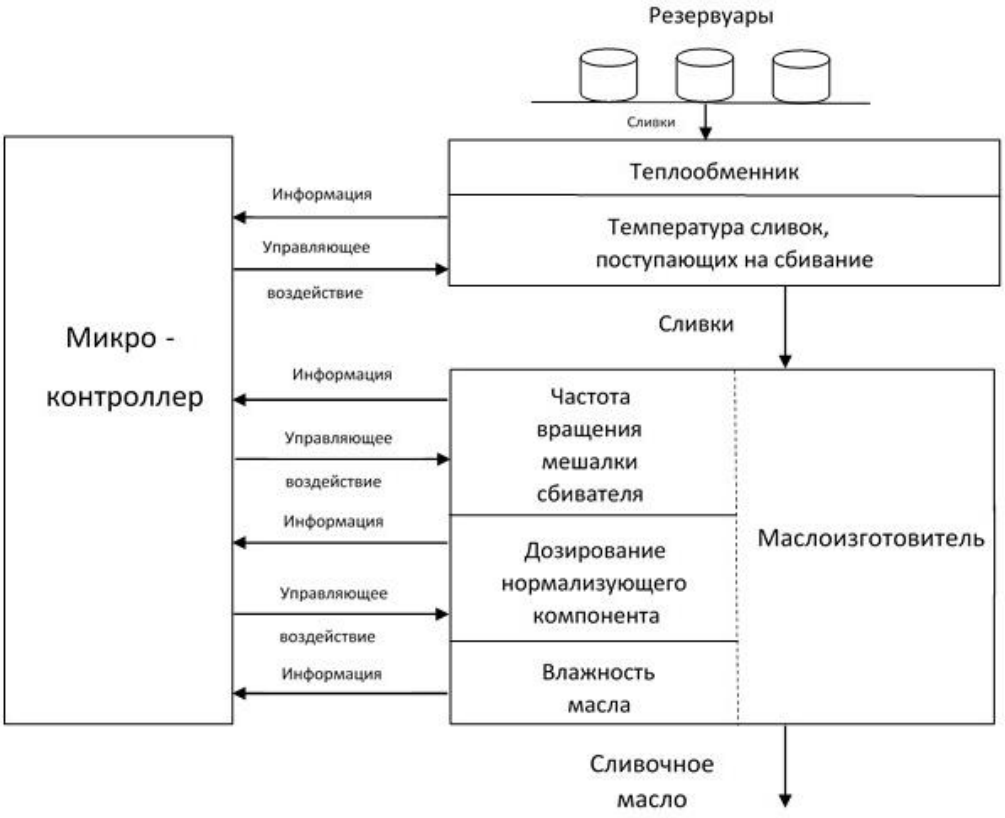


Рис. 2. Структура многоконтурного управления процессом производства сливочного масла

В сформированной структуре многоконтурной системы управления предусмотрено внесение управляющих воздействий по аппаратурно-технологическим каналам процесса производства сливочного масла. В эксплуатационном режиме работы маслоизготовителя снижение времени запаздывания путем предвычисления ожидаемого возмущения исключает тем самым отклонение температуры сливок в теплообменнике при подаче в маслоизготовитель. Для повышения коэффициента передачи управляющего воздействия используется суммированное воздействие аппаратурно-технологических каналов систем, взаимосвязанных с влагосодержанием сливочного масла на выходе маслоизготовителя.

При возникновении неуправляемых ступенчатых возмущающих воздействий при подключении очередного резервуара с отклонениями по содержанию жира в сливках или температуры режима созревания, используется суммарное воздействие с параллельно-последовательным внесением управляющих воздействий. При этом возрастающее влияние управляющего воздействия со стороны канала частоты вращения мешалки сбивателя на процесс стабилизации влагосодержания продукта заменяют управляющее воздействие канала внесения нормализующего компонента. Такой способ внесения управляющих воздействий, учитывая сложные по форме возмущения, обеспечивает оперативную стабилизацию влагосодержания масла на конечном этапе производства [11].

Основу структурной схемы многоконтурного управления составляет микропроцессор, обеспечивающий формирование операций стабилизации влагосодержания сливочного масла, производимого в многофакторном аппаратурно-технологическом комплексе. Принятая структурная схема в процессе выполнения операций по стабилизации влагосодержания сливочного масла обеспечивает режим работы каналов управления в технологически и аппаратурно-рекомендованных пределах. Экономическая эффективность рассмотренных технических решений обоснована в работе [12].

Литература

1. Тихомирова Н.А. «Технология молока и молочных продуктов. Технология масла (технологические тетради)». СПб.: ГИОРД. – 2011. – 144 с.
2. Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я. АСУТП цельномолочных и молочно-консервных производств: Справочник. М.: Колос. – 1993. – 367 с.
3. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. М.: «Высшая школа». – 2005. – 767 с.
4. Стегаличев Ю.Г., Балюбаш В.А., Замарашкина В.Н. Технологические процессы пищевых производств. Учебное пособие для ВУЗов. Ростов/Д-СПб.: Феникс. – 2006. – 254 с.
5. Грищенко А.Д. сливочное масло. М.: Легкая и пищевая промышленность. – 1983. – 293 с.
6. Вышемирский Ф.А., Иванова Н.В. Масло из коровьего молока: стандартизация и терминология // Сыроделие и маслоделие. – 2005, №1. – С. 2-24.
7. Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Стегаличев Ю.Г. Технологический анализ и моделирование многоканальных технологических комплексов. Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО. – 2016. – 121 с.
8. Балюбаш В.А., Алёшичев С.Е. Формирование многоканальной системы стабилизации влажности сливочного масла // Сыроделие и маслоделие. – 2007. – № 2. – С. 45–46.
9. Пат. 2497355 Российская Федерация, МПК, A01J 15/00. Способ стабилизации влажности сливочного масла при его производстве в маслоизготовителях

непрерывного действия / Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Ересько Г.А., Майборода Ю.В.; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 6 с.: ил.

10. Пат. 2302108 Российская Федерация, МПК, A 01 J 15/00, G 05 D 27/02. Способ стабилизации сливочного масла по влажности / Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Стегаличев Ю.Г.; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 19. – 7 с.: ил.
11. Пат. 2497355 Российская Федерация, МПК, A01J 15/00. Способ стабилизации влажности сливочного масла при его производстве в маслоизготовителях непрерывного действия / Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Ересько Г.А., Майборода Ю.В.; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21 – 4 с.: ил.
12. Иванов В.Л., Поляков Р.И., Травина Е.А. Проблемы и экономическая эффективность автоматизации контроля качества продукции на предприятиях пищевой отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Том 9. № 1А. С. 121-134.

УДК 66-5, 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ШАМПУНЕЙ

В.Л. Иванов, Д. Кали, Сунь Чжаоян, Е.А. Травина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vlivanov@itmo.ru

Аннотация
В статье исследован технологический процесс производства шампуней в новом цеху производства товаров личной гигиены завода «Северное Сияние» глубокой степени автоматизации, входящего в производственное подразделение компании ООО «Юнилевер Русь». Цель исследования: совершенствование системы управления производством. На основании проведённых исследований предложены решения по совершенствованию системы управления, а также разработаны решения по охране труда, проведён расчёт экономической эффективности предложенных решений.
Ключевые слова
Автоматизация, система управления, технологические процессы.

На площадке нового цеха завода «Северное Сияние» были размещены три автоматизированные линии: две мощностью по десять тонн и одна мощностью в пять тонн, суммарной производительностью 150 тонн в сутки. Кроме непосредственно оборудования приготовления цех располагает 12 системами хранения расходных материалов, таких как эмульсии, щёлочи, кислоты, консерванты и поверхностно-активные вещества (ПАВ), системами подготовки горячей и холодной технологической и разогрева технической воды. Также реализована система охлаждения технической воды посредством чиллерной установки. Каждый процесс приготовления состоит из реактора, пяти или шести, в зависимости от технологической направленности, премиксеров, танков хранения, системы раскачки кубов IBC, двух двух-пигговых (от англ. *pigging*) систем и системы CIP.

Система автоматизации – это фундамент для решения задач по увеличению производительности, повышению качества конечного продукта, сокращению периода простоев, минимизации негативного влияния человеческого фактора, сокращению текущих эксплуатационных расходов, планированию новых продуктов и созданию предпосылок для перехода на новые системы при минимальных затратах [1]. Основой для построения системы управления технологическим процессом была выбрана платформа Siemens SIMATIC ProcessControlSystem 7, как одна из наиболее актуальных и совершенных на текущий момент [2 – 4].

В процессе пуско-наладочных работ был выявлен целый ряд проблем и несоответствий требованиям, установленным на производственной площадке в соответствии с внутренними регламентами.

Одной из основных проблем стала реализация защиты от перелива технологических емкостей только на программном уровне: в логике программы контроллера реализован механизм опроса радарных датчиков верхнего уровня, установленных на верхних конусах, и, в случае регистрации уровня выше заданного, остановки подачи в ёмкости. При уровне доступа к программе управления, начиная от старшего оператора, у пользователей системы присутствует возможность симуляции показаний датчиков и состояний исполнительных механизмов. В условиях отладки параметров технологического процесса это приводило к систематическим

переполнениям ёмкостей при промывках и других процедурах, связанных с их наполнением. Перелив технологических ёмкостей представляет непосредственную опасность для персонала и оборудования, а также приводит к увеличению расходов предприятия. Так, за 2017 год, это привело к убыткам в 1,280,000 рублей. Эта сумма включает стоимость потери готового продукта, его последующие утилизации, повешенной амортизации очистных сооружений и стоимость простоя цехов фасовки и приготовления.

Открытие крышек люков технологически ёмкостей контролировалось при помощи бесконтактных индуктивных датчиков, подключённых к дискретным входам модулей распределённой периферии. Из-за использования в технологии производства таких активных веществ, как кислоты, щёлочи, растворы хлора и полимеров, а также CIP-моек и термических дезинфекций бесконтрольное открытие крышки люка ёмкости оператором во время технологического процесса могло привести к тяжёлым последствиям.

Разделение прав доступа к системе управления не является панацей, так как рано или поздно технологический персонал получает доступ высокого уровня.

Оценка риска, подобно анализу всех операций производства, начинается с ясного понимания границ опасных зон и операций на рабочем участке. Эти факторы исследуются, чтобы определить, какие из них несут потенциальную опасность. По полученным данным может быть оценена степень риска. В зависимости от результата определяется эффективность существующих мер по обеспечению безопасности и потребность в дополнительных мерах, необходимых для снижения риска и выявление областей, в которых необходима дополнительная защита [5, 6]. Команда менеджеров проекта провела оценку рисков получения травм персоналом при переливах и присвоила статус «Высокий», что выявило необходимость разработки эффективной защиты от перелива, исключающей человеческий фактор.

Необходимость применения систем противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) устанавливается «Общими правилами взрывобезопасности для взрывопожароопасных, химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденных приказом Ростехнадзора №96 от 11.03.2013, пункты 3.10, 3.12, 3.20, а более детальные требования описываются в разделах 6.3 и частично 6.2 указанных правил.

По экономическим соображениям для реализации проекта были выбраны в первую очередь танки хранения, как часть одного из наиболее проблемных технологических этапов.

Для разработки и интеграции ПАЗ, соответствующей требованиям, необходимо понимание всей АСУ в целом и каждой из технологий, её составляющих. Выделение системы противоаварийной защиты в составе АСУТП призвано обеспечить повышенный уровень безопасности ведения технологического процесса.

Основа системы, среда Siemens SIMATIC ProcessControlSystem 7 (в дальнейшем PCS7), имеет гибкую архитектуру и позволяет осуществлять управление как самим производственным процессом, так и связанными с ним вспомогательными, такими как водоснабжение, охранные системы и системы видеонаблюдения, системы удаленного мониторинга, электрическая инфраструктура в виде распределительных устройств низкого или среднего напряжения, инфраструктура зданий и т. п. PCS7 легко интегрируется в любую систему автоматизированного управления в рамках концепции комплексной автоматизации TotallyIntegratedAutomation (TIA), которая предоставляет полный спектр совместимых друг с другом продуктов, систем и решений для разработки унифицированной, но в то же время отвечающей конкретным требованиям системы автоматизации процессов.

PCS7 является однородной, функционально полной интегрированной системой, создающей универсальную платформу для решения задач комплексной автоматизации

предприятий различных отраслей промышленного производства, с помощью которой может быть обеспечена экономичная, широкомасштабная интеграция систем управления всеми производственными процессами в единую систему управления предприятием [5].

Из-за несовершенств системы управления на производстве во время пуско-наладочных работ произошёл ряд нештатных ситуаций. По результатам анализа произошедших нештатных ситуаций, технологического процесса и уже имеющейся АСУ была разработана модернизированная схема автоматизации для удовлетворения технических требований к ПАЗ и защиты от переполнения технологических емкостей и несанкционированного доступа.

Для контроля и регулирование технологических параметров готового продукта в процессе перекачки в танки и хранения использован модуль распределённой периферии с аналоговыми и дискретными входами и выходами. Модуль подключен к контроллеру посредством сети Profibus. Предложенный проект позволит избежать нештатных ситуаций на протяжении всего времени полезного использования. Предложенные решения апробированы на опытно-промышленной установке ООО «Юнилевер Русь», где была подтверждена их состоятельность и эффективность.

Литература

1. Зимин В.В. Промышленные сети. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2006. – 252с.
2. Siemens [Электронный ресурс] // Оборудование для автоматизации [сайт]. URL: http://siemens.com.
3. SIMATIC Process Control System PCS 7. Инструкция по программированию блоков – сетевое издание SIEMENS. URL: https: // cache.industry.siemens.com/dl/files/210/15230210/att_82320/v1/PCS7_CreatingBlocks_V6_r.pdf.
4. SIMATIC. Система управления процессом PCS 7. Система проектирования. - сетевое изданиеSIEMENS. URL: https: //cache.industry.siemens.com /dl/files/752/21407752/att_81825/v1/PCS7_6.1_EngSys_r.pdf.
5. Иванов В.Л., Поляков Р.И., Травина Е.А. Проблемы и экономическая эффективность автоматизации контроля качества продукции на предприятиях пищевой отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 121-134.
6. Балюбаш В.А., Алешичев С.Е., Травина Е.А., Иванов В.Л. Особенности управления многофакторными объектами пищевых производств // Экономика: вчера, сегодня, завтра – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 845.

УДК 004.9:338.45

ПРОБЛЕМЫ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ

В.Л. Иванов, Р.И. Поляков, Е.А. Травина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vniig-audit@mail.ru, rpolyakov@mail.ru, tea-922@mail.ru

Аннотация
В докладе рассмотрены принципы разработки, оценка на соответствие нормативным требованиям и экономическая эффективность автоматизации контроля качества продукции на предприятиях пищевой отрасли. Применение подобных технологий становится актуальным для использования в системе ХАССП. В работе авторами указывается, что требуется формирование не только принципов выбора оборудования и средств автоматизации, но также и стратегии по его обоснованию и производству. Авторы показывают, что основная задача данного процесса – повышение эффективности производственного процесса в пищевой промышленности.
Ключевые слова
Автоматизация, пищевое оборудование, пищевая промышленность, технологический процесс, продовольственная безопасность.

Понимание важности безопасности и качества пищевых продуктов приобретает все большее значение в мире и, в частности, в России. Обеспечение населения высококачественными, безопасными товарами – одно из основных условий нормального физического и психофизиологического развития населения, формирования высокой устойчивости организма к различным заболеваниям и вредным факторам окружающей среды. Главное направление в формировании продовольственной безопасности в России на современном этапе – это удовлетворение постоянно растущего спроса населения на товары повышенного качества и безопасности, особенно это касается товаров, реализуемых предприятиями пищевой и фармацевтической промышленности.

Показано, что целесообразным и эффективным является автоматизированный контроль качества пищевой продукции не на конечном этапе ее производства или на этапе реализации, а поэтапный контроль в так называемых критических точках – этапах технологического процесса, на котором возможно проведение контроля, и который имеет существенное значение для предотвращения или устранения риска, угрожающего безопасности пищевого продукта, для его уменьшения до приемлемого уровня [1, с. 275].

Такой новый подход к производству безопасных продуктов питания отражен в основных принципах системы анализа рисков и контроля (регулирования) в критических точках ХАССП (лат. HACCP – Hazard Analysis and Critical Control Points). ХАССП – система для идентификации, оценки, анализа и контроля рисков, которые важны для безопасности пищевых продуктов.

Опираясь на основные требования системы HACCP, предприятиям пищевой промышленности и общественного питания целесообразно внедрять систему управления безопасностью пищевых продуктов (СУБПП), обеспечивая защиту

потребителей от опасностей, которые могут сопровождать производство, хранение и реализацию сырья и готовой продукции.

Преимущества, которые дает предприятию внедрение системы СУБПП:

– гарантия выпуска безопасной продукции, благодаря систематическому контролю на всех этапах производства;

– демонстрация соответствия действующим законодательным и нормативно-правовым документам по безопасности пищевых продуктов;

– уменьшение потерь, связанных с отзывом продукции, штрафными санкциями и судебными исками;

– расширение сети потребителей продукции и возможность выхода на международный рынок.

Основные этапы разработки и внедрения СУБПП:

– выявление и анализ факторов, негативно влияющих на пищевую безопасность;

– определение критических точек управления, их границ, а также системы их мониторинга, преимущественно, автоматизированного;

– обеспечение возможности обучения персонала основным принципам НАССР;

– установление и документирование процедуры проверки и подтверждение того, что СУБПП функционирует результативнои в соответствии с предусмотренными требованиями.

Главным отличием новой системы от действующих процедур контроля качества является четкое закрепление ответственности оператора рынка в рамках своей деятельности за несоблюдение требований законодательства о безопасности пищевых продуктов. Иначе говоря, ответственность за производство некачественной, опасной для здоровья человека продукции, будет нести производитель.

Введение превентивного подхода к контролю вместо необходимости бороться с последствиями – это еще одно кардинальное изменение системы.

Согласно новому подходу будет подлежать контролю вся цепь производства пищевого продукта. Это позволит выявить угрозу на раннем этапе и предотвратить производство опасного продукта и его реализацию потребителю. На законодательном уровне это закреплено в форме требования об обязательном внедрении системы управления безопасностью пищевых продуктов на принципах НАССР.

Для полного, безболезненного и эффективного внедрения НАССР на предприятиях закон предусматривает значительные переходные периоды. Например, на предприятиях, производящих пищевые продукты, в состав которых входят активные ингредиенты животного происхождения, НАССР должен был быть введен до 2017 года, производители соков и конфет должны справиться с задачей до 2018 года, а владельцы всех малых предприятий - до 2019 года. Ряд исключений, предусмотренных для учреждений розничной торговли, общепита, кондитерских, пекарен дает возможность ввести упрощенный НАССР [8, с. 130].

Операторы рынка будут нести ответственность за нарушение законодательства о безопасности, в т.ч. и за ухудшение отдельных показателей качества пищевых продуктов. Установление существенных штрафных санкций за невыполнение требований законодательства для пищевых предприятий является действенным решением, которое уже не один год доказывает свою эффективность в развитых странах мира.

Внедрение системы НАССР позволит защитить не только права потребителей, но и стать помощником для производителей и реализаторов продовольственной продукции. Так, НАССР помогает производителю структурировать все производственные процессы и, в случае проблем на рынке, доказать свою

невиновность, если пищевой продукт был испорчен, например, при транспортировке или в результате несоблюдения условий хранения. Прослеживаемость помогает определить ненадежных поставщиков и дистрибьюторов, а также отозвать проблемный товар и предотвратить крайне нежелательные последствия, например, массовые отравления [4, с. 42].

При наличии системы HACCP существенно смягчаются условия получения необходимой разрешительной документации для предприятий, осуществляющих деятельность, связанную с производством или хранением пищевых продуктов животного происхождения. Для ряда других предприятий, включая заведения общественного питания и часть заведений розничной торговли, достаточно будет прохождения простой процедуры регистрации [6, с. 72].

Приведенный перечень нововведений не полон, но он дает возможность понять, почему необходимо изменить действующую систему безопасности пищевых продуктов и внедрить новые, более эффективные подходы.

Таким образом, следствием внедрения предложенных инноваций будет повышение защиты прав потребителей, совершенствование системы государственного контроля в сфере безопасности пищевых продуктов с учетом требований законодательства и минимизации негативных последствий необоснованного государственного вмешательства в сферу производства и обращения пищевых продуктов

Внедрение новых высокоэффективных подходов к обеспечению пищевой безопасности предопределяет необходимость проектирования оборудования для пищевой промышленности с учетом ряда специальных условий.

Материалы, используемые в конструировании оборудования для пищевых производств, должны удовлетворять определенным специфическим требованиям. Материалы, контактирующие с продуктом, должны, при условии надлежащей эксплуатации, быть инертными по отношению, как к продукту, так и к дезинфектантам. Также они должны быть устойчивыми к коррозии, нетоксичны, механически стабильными, а на чистоту обработки поверхности не должно быть негативного влияния при надлежащей эксплуатации. Материалы, не контактирующие с продуктом, должны быть механически стабильными, с достаточной чистотой обработки поверхности и легко очищаться. Необходимо отметить, что следует поддерживать поиск и внедрение новых или улучшенных материалов для использования в пищевой промышленности и консультации с поставщиками материалов, где это необходимо.

Поскольку наличие в пищевых продуктах токсичных элементов недопустимо, проектировщик должен позаботиться о том, чтобы только нетоксичные конструкционные материалы использовались в местах прямого контакта с продуктом. Необходимо применять все правовые нормативы (поскольку многие страны имеют сборники нормативов и директив, в которых указывается список материалов, допускаемых к контакту с пищевыми продуктами) и следует обеспечить использование толькотех материалов, использование которых разрешено действующим законодательством.

Материалы, которые используются для контакта с продуктом, должны:

– обладать достаточной прочностью в широком диапазоне температур;

– иметь приемлемый срок службы;

– быть нетоксичными; не разрушаться и не абсорбировать контактирующие вещества;

– быть устойчивыми к растрескиванию, обламыванию, разрушению коррозией и истиранию;

– предотвращать проникновение нежелательных веществ в пределах предполагаемого использования;

– легко очищаться и иметь способность сохранятьзаданную форму.

Нержавеющая сталь обычно отвечает всем этим требованиям. Существуют различные марки нержавеющей стали, которые могут быть выбраны по их конкретным свойствам для удовлетворения эксплуатационных требований. Например, нержавеющая сталь AISI-316 с содержанием молибдена может использоваться там, где необходима повышенная коррозионная стойкость.

В общем, нержавеющая сталь имеет отличную коррозионную стойкость, поэтому она широко используется в пищевой промышленности. Перечень нержавеющих сталей, пригодных к использованию, достаточно широк, поэтому выбор приемлемого типа нержавеющей стали будет зависеть от ее коррозионных свойств (учитывая ионы, которые контактируют со сталью, а также pH и температуру контактной среды), процесса очистки и инертности антимикробных химикатов, которые для этого используются. Вместе с тем, на выбор будут влиять условия нагружения, при которых работает материал, пригодность стали для механической обработки, для сварки, твердость, а также цена [5, с. 176].

Для случая, когда требуется хорошая резистентность к общей атмосферной коррозии, наилучшим выбором будет сталь AISI-304 (аустенитная нержавеющая сталь 18%Cr/10%Ni), или ее низко-углеродистая версия AISI-304L (DIN 1.4307; EN X2CrNil8-9), которая более пригодна для сварки [2, с. 20].

В случае, когда как уровень хлоридов, так и уровень температур примерно вдвое превышают указанные выше величины, выбранный материал должен иметь большую резистентность к щелочно-точечной коррозии, которая может быть результатом локальной концентрации хлоридов. Добавление молибдена к AISI-304 (создавая AISI-316) увеличивает коррозионную резистентность, и поэтому этот тип нержавеющей стали рекомендуется для компонентов такого оборудования, как клапаны (вентили), корпуса, насосы, роторы и валы, в то время как его низкоуглеродистый аналог AISI-316L (DIN 1.4435; EN X2CrNiMol 8-14-3) рекомендуется для трубопроводов и резервуаров, благодаря лучшей пригодности к сварке. Также, как альтернативный материал, может быть использован титан.

При приближении температуры к 150 °C, даже в деталях, изготовленных из стали AISI-316 может происходить стресс-коррозионное образование трещин в тех случаях, когда высоконапряженные места подвержены воздействию высоких уровней концентрации хлоридов. В этих случаях следует применять стали AISI-410, AISI-409, AISI-329, или даже инколой 825, поскольку они имеют большую механическую прочность и коррозионную резистентность, хотя и являются более дорогими.

Нержавеющие стали - обоснованный выбор конструкционного материала для технологического оборудования для пищевой промышленности, но, в зависимости от места применения, некоторые полимерные материалы могут иметь преимущества перед нержавеющими сталями, например, вследствие более низкой стоимости, меньшего веса или улучшенной химической резистентности. Безусловно, такие материалы (эластомеры, смазочные материалы, прокладки и импульсные жидкости) должны быть нетоксичными.

Важно избегать непосредственного соединения металл-металл, кроме сварки, так как контакт металл-металл может содержать загрязняющие вещества и микроорганизмы. В случае с оборудованием, предназначенным для асептической обработки, уплотнение металл-металл не будет препятствовать проникновению бактерий.

Перечисленным выше требованиям должно удовлетворять не только основное, но и вспомогательное оборудование, применяющееся в пищевой промышленности, в том числе и на предприятиях общественного питания.

В настоящее время рынок нейтрального вспомогательного оборудования достаточно широк.

Чаще всего для изготовления вспомогательного оборудования используется нержавеющая сталь марок AISI 304 иAISI 430. Оборудование из стали марки AISI 430 имеет срок эксплуатации около 5-6 лет, а модели, изготовленные из стали марки AISI 304, обладающей большей стойкостью к коррозии, могут использоваться до 10 лет.

Таким образом, для долговременного использования оборудования предпочтительно выбирать модели из нержавеющей стали марки AISI 304. Проверить, из какого материала изготовлено оборудование, достаточно легко – сталь AISI 304 практически не обладает магнитными свойствами.

Также при выборе изделий важно обращать внимание на толщину деталей из нержавеющей стали. Как правило, вспомогательное оборудование изготавливается из листа толщиной от 1 мм и больше. Слишком тонкие стенки моечной ванны или стола приводят к быстрому истиранию и необходимости покупки нового оборудования. При этом необходимо учитывать предполагаемый срок эксплуатации и возможности бюджета.

Эластомеры и другие полимеры должны сохранить свои поверхности и конформационные характеристики при условиях, которые имеют место в процессе производства, очистки и обеззараживания. При выборе полимерных материалов нужно принять во внимание следующие критерии:

– соответствие требованиям и рекомендациям;

– совместимость с пищевыми продуктами и соединениями (химическая нейтральность в отношении масла, жиров, консервантов);

– химическая инертность к очищающим и дезинфицирующим веществам;

– устойчивость к долговременному воздействию рабочей температуры (как низкой, так и высокой);

– устойчивость к обработке паром во время CIP-мойки;

– выдерживание динамических напряжений;

– гидрофобность, реакционные способности поверхности;

– возможность очистки, структура и шероховатость поверхности, накопления остатков;

– другие требования (адсорбция, десорбция, действие щелочей, твердость, упругость, резистентность к холодным потокам, абразивная резистентность, технология обработки).

Полимеры, которые часто используются в оборудовании, спроектированном с соблюдением гигиенических требований: ацетал (гомо- и ко-полимер) (POM), флюорополимери, политетрафлюоретилен (PTFE, модифицированный PTFE), перфлюалкойдная смола, поливиниденфлюорид (PVDF), флюорованыйэтилен пропиленовые сополимеры (FEP) полиэтилен салон (PPSU), полипропилен (PP), полисальфон (PSU), поливинилхлорид, не пластичный (PVC) [6, с. 33].

При использовании полимерных материалов следует помнить, что некоторые их виды могут быть пористыми и плохо поддаваться очистке. Однако, некоторые виды модифицированных PTFE и полностью флюоринованные сополимеры, такие как PFA, удовлетворяют требованиям EHEDG по способности к очистке.

Полимерные материалы, подобно другим конструкционным материалам, таким, как стекло, сталь или эмали, должны выбираться согласно предполагаемых условий эксплуатации проектируемого оборудования.

Некоторые полимеры, например флюорополимеры, могут быть использованы в качестве покрытия (слоем толщиной от 0,5 до 1,2 мм) металлических поверхностей для улучшения их резистентности к химическим соединениям. Технология нанесения покрытия зависит от геометрических характеристик оборудования.

Резиновые материалы и другие эластомеры обычно используют для прокладок, уплотнений, скребков и других подобных элементов. При этом следует учитывать, что избыточное механическое или тепловое воздействие приводит к необратимой деформации деталей из этих материалов.

При выборе конкретного эластомера надо учитывать те же параметры, которые были приведены выше для выбора полимеров. Когда речь идет о готовых деталях, важным становится вопрос их идентификации, отслеживания и соблюдения требований нормативных документов. Например, соответствие нормативам FDA осуществляется через сертификаты по контактированию с пищевыми продуктами FCN и через документы, подтверждающие соответствие требованиям, например, акта 21 CFR 177.2600.

Типы эластомеров, которые могут быть использовании в пищевой промышленности в качестве изоляции, прокладок и колец:

– этилен-пропилен-диен-мономер (EPDM) - масло- и жиро-нерезистентный;
– флюороэластомер (FKM) - может быть использован для температур не выше 180°C;
– гидратированная нитрит бутил резина (HNBR);
– натуральная резина (NP);
– нитрит/бутил резина (NBR)
– силиконовая резина (VMQ) - также может быть использована для температур не выше 180°C;
– перфлюороэластомер (FFKM) - может быть использован для температур не выше 300°C.

Клеящие материалы должны во всех случаях соответствовать требованиям нормативов FDA и рекомендациям поставщика оборудования, с которым они используются. Это условие должно обеспечить гарантию, что использование данного клеевого материала не повлечет за собой локализованную коррозию нержавеющей стали оборудования, или не приведет к выделению токсичных веществ в условиях проектной эксплуатации. Все соединения должны быть непрерывными и механически стабильными, чтобы компоненты не отделялись от базового материала, к которому они присоединяются.

Тепловая изоляция оборудования должна быть выполнена таким образом, чтобы влага из внешней среды не проникла в материал изоляции с внешней стороны оборудования (например, в результате стекания или конденсации на холодных поверхностях). Изоляционные материалы не должны иметь хлоридов в своем составе. В противном случае накопление влаги может привести к образованию хлоридов на поверхности нержавеющей стали, что, в свою очередь, вызовет стрессовую или точечную коррозию. Увлажнение изоляционного материала приводит к потере изоляционных свойств.

Импульсные жидкости могут контактировать с рабочими продуктовыми жидкостями при условии нарушения перегородки (мембраны) между ними. Поэтому импульсные жидкости должны иметь разрешение на применение в пищевой промышленности.

Дерево – материал, который используют в ограниченных случаях, например, для регулирования относительной влажности и/или микробиологической обстановки (например, в условиях созревания сыра, в производстве вина, уксуса и т. п) или когда его механические свойства не могут заменить другие доступные материалы (например, при рубке мяса). Деревянные поверхности должны быть тщательно очищены и продезинфицированы после применения, потому что они имеют способность сохранять микроорганизмы, которые в дальнейшем размножаются при наличии остатков

питательных сред обрабатываемых продуктов. Щепки от деревянных поверхностей могут загрязнять продукт [3, с. 86].

Материалы для поверхностей, которые не контактируют с продуктами, должны быть простыми в обслуживании и устойчивыми к воздействию продуктов, моющих и дезинфицирующих средств. Как и для поверхностей, контактирующих с продуктом, лучшей является нержавеющая сталь. Если элементы оборудования имеют покрытие (например, двигатели, приводы, корпуса), оно должно быть нетоксичным и устойчивым к растрескиванию, появлению зазубрин или шелушению. Элементы с покрытием не должны быть расположены непосредственно над открытыми продуктовыми зонами. Изоляция должна быть непроницаема для пара, чтобы избежать роста микроорганизмов.

Существуют и специфические требования к строительным материалам. Все поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, должны легко очищаться. Поверхность должна быть гладкой, следовательно, непрерывной и без трещин, щелей, царапин и углублений, в которых после очистки может оставаться грязь и/или микроорганизмы. Хотя ключевым требованием для поверхностей является возможность качественной очистки, а не гладкость, определена максимальная шероховатость поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами, так как продолжительность очистки увеличивается в зависимости от требуемой шероховатости поверхности. И американская, и Европейская группа по гигиеническому конструирование оборудования (EHEDG) ограничивают максимальную шероховатость поверхности для контакта с пищевыми продуктами. Поверхности, контактирующие с продуктом, должны иметь обработку допустимого значения Ra и не иметь недостатков, таких как заглубление, складки и щели (для определения Ra см. ISO 1982). Для больших площадей поверхности, контактирующие с продуктом, шероховатость должна быть от 0,8 мкм Ra или лучше. Шероховатость больше 0,8 мкм может быть приемлемой, если результаты теста показали, что требуемая степень очистки достигается за счет других конструктивных особенностей. Для закрытого оборудования, которое используется для наполнения жидкостями и, как правило, очищается на месте (CIP), рекомендуются поверхности от 0,8 мкм Ra. Более высокие значения Ra являются приемлемыми, если может быть доказано, что поверхности хорошо очищаются. Следует отметить, что холоднокатаная сталь имеет шероховатости Ra от 0,2 до 0,5 мкм и, как правило, не требует полировки при условии, что поверхности контакта с продуктом не имеют углублений, трещин и складок, после того, как окончательно придана форма. Однако, шлифовка нужна для горячекатаной стали, если нет специальных требований. Так как шероховатости поверхностей литых материалов и углеродистых сталей не соответствуют рекомендованным значениям, возможность очистки элементов оборудования из этих материалов требует дальнейшего изучения. Поверхности, которые не контактируют с продуктами, должны быть достаточно гладкими, чтобы гарантировать легкую очистку. Пористые поверхности, как правило, неприемлемы. Состояние поверхности напрямую определяет способность к очистке. Углубления, сгибы, щели, разрывы поверхности и прочие неровности не должны иметь место, поскольку они образуют участки, недоступные для технологической очистки.

Поверхности, которые не контактируют с пищевыми продуктами, должны быть достаточно гладкими, чтобы гарантировать легкость очистки.

Оборудование должно быть спроектировано таким образом, чтобы масла не контактировали с пищевым продуктом. В случае возможности случайного контакта, смазки должны соответствовать нормативам Программы регистрации непищевых смесей (NSF). Эти требования превышают требования USDA, основанные на регулятивных требованиях по использованию ингредиентов и торговых марок, включая FDA 21 CFR. Документ 23 EHEDG определяет компоненты, которые допустимо

использовать в смазках и в качестве защитного слоя от коррозии, против протекания или потерь рабочего вещества у прокладок, а также как смазочные материалы для частей оборудования, контактирующих с пищевыми продуктами.

Таким образом, пищевая безопасность должна обеспечиваться как путем автоматизации контроля качества производства в критических точках технологического процесса, так и применением на всех технологических этапах соответствующих, нейтральных к сырью и пищевым продуктам материалов.

Литература

1. Иванов В.Л., Балюбаш В.А. Исследования и практика разработки автоматизированных систем контроля состава и свойств пищевых продуктов // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург,17–20 ноября 2015 г.): Материалы конференции -2015. – № 1. – С. 275-276.
2. Байер Е. Anugafoodtec – технологии и оборудование для пищевой промышленности // Мясной ряд. 2015. № 1 (59). С. 18-21.
3. Зайченко Д.А. Отечественное оборудование для пищевой промышленности // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2015. № 1 (27). С. 82-88.
4. Фриче В.Оборудование для обработки пищевых продуктов и упаковки: Россия и немецкие технологии // Пищевая индустрия. 2016. № 1 (27). С. 42.
5. Хузина А.Ф., Фролова И.И. Управление оборудованием на предприятиях пищевой промышленности // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2016. № 6 (16). С. 172-178.
6. Шабурова Г.В., Курочкин А.А., Фролов Д.И. Инновационное оборудование для пищевой промышленности // Пищевая промышленность. 2014. № 2. С. 72.
7. Шихов С.С., Воронцова В.Е. Оборудование поможет соответствовать требованиям международных пищевых стандартов // Мясные технологии. 2016. № 1 (157). С. 32-33.
8. Щербак Т.А., Агеева А.А. Технологии и оборудование пищевых производств // В сборнике: Будущее науки-2016 Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции : в 4-х томах. 2016. С. 128-130.

УДК 620.09:33(07)

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КАЗАХСТАНА

Г.Д. Когай[1], Т.Л. Тен[2], В.Л. Иванов[3], В.Г. Дрозд[2], А.Л. Те[4]

1 – Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Респ. Казахстан
2 – Карагандинский экономический университет, г. Караганда, Респ. Казахстан
3 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
4 – Алматинская академия экономики и статистики, г. Алматы, Респ. Казахстан

vlivanov@itmo.ru

Аннотация
В работе рассмотрены анализ развития электроэнергетического сектора экономики Казахстана с точки зрения прогнозирования надежности и энергообеспечения экономического роста страны. Проведен количественный анализ прогнозирования динамики основных ресурсов в топливно-энергетическом комплексе Казахстана по временному ряду по методу гармонических весов.
Ключевые слова
Электроэнергия, энергетическая система, линии электропередач, нефтегазовый сектор, прогнозирование динамики, скользящий тренд, параметры уравнения, объем производства.

На сегодняшний день энергетика выступает одной из важнейших движущих сил мирового экономического прогресса, а электроэнергетическая отрасль, выступает как одна из базообразующих отраслей экономики любой страны и играет важнейшую роль, как в политической, экономической, так и в социальной сфере государства.

Возрастающую нагрузку на энергетику Казахстана уже сегодня накладывает задача ускоренного развития ее обрабатывающего сектора и диверсификации экономики [1].

Также, одним из факторов роста нагрузки на энергетику выступает проблема развития и выживания малых городов, которых немало в Казахстане и насчитывается их около 60. Главной проблемой в данном случае выступает их тепло- и электроснабжение. Весьма удаленные от энергетических и топливных источников, малые города обладают стратегической демографической значимостью.

Так, в период мирового финансового кризиса в Казахстане в промышленных отраслях наблюдалось снижение объема производства и, как следствие, произошло снижение потребления электроэнергии промышленным сектором страны, на долю которого приходится 68,7 % от общего объема потребления электроэнергии.

Потребление нефти к 2035 году будет сосредоточено в двух секторах – нефтехимии и транспорте. Растущие цены на нефть должны будут способствовать росту энергоэффективности производства, что должно ослабить позиции нефти для тех секторов, в которых имеются альтернативные доступные источники энергии. Сформировавшиеся тенденции на мировом энергетическом рынке дают [2].

Спрос на уголь в Казахстане, по данным экспертов, в ближайшее время будет только расти. На территории Павлодарской области имеется целый ряд крупнейших компаний по добыче угля: ТОО «Богатырь» (30,7 % всей добычи страны), ТОО «Разрез Северный»(21,7%), СП «Майкубен – Вест» (2,3%), в Карагандинской области: АООТ

«Борлы» ТОО «Корпарация Казахмыс» (8,8%) и АО «Миттал Стил Темиртау» (13,1%). Коксующийся уголь, который является самым ценным, добывается только в Карагандинском бассейне.

Рассматривая вопрос о дальнейшем развитии угольной отрасли в Казахстане, следует иметь ввиду факторы экономического и технологического вида.

В республике имеется 15 гидравлических электростанций обладающих суммарной мощностью более чем в 2270 МВт. Из которых пять имеют мощность более 100 МВт (Бухтарминская – 675 МВт, Шульбинская – 700 МВт, Капчагайская – 364 МВт на реке Или, Усть-Каменогорская – 330 МВТ на реке Иртыш, Чардаринская – 100 МВт на реке Сырдарья). Другие ГЭС выдают мощность менее 10 МВт.

При помощи линий электропередач (ЛЭП) все крупные энергоисточники в Казахстане объединяет Единая энергетическая система.

Топливно-энергетический комплекс выступает локомотивом экономического роста страны, который включает в себя основные невозобновляемые ресурсы, такие, как нефтегазовый сектор, угольная промышленность, тепло- и электроэнергетика, динамика данных по которым представлена в таб. 1.

Таблица 1

Динамика основных ресурсов в ТЭК РК за 2010-2017гг.

Виды экономической деятельности	Объем промышленного производства по годам							
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Добыча угля, включая концентрат угольный, тыс. тонн	111072	100854	110929	116449	120528	119574	114563	107318
Добыча нефти, включая конденсат газовый, тыс. тонн	70671	76483	79685	80061	79225	81787	80826	79459
Производство электроэнергии тепловыми электростанциями,млн. кВт.ч	80 341	78 729	76 621	78651	82900	84760	78049	73078
Производство тепловой энергии, тыс.Гкал	94102	93734	96387	98021	103350	94099	80975	80792

Примечание: составлено авторами на основе статистических данных

Анализ развития электроэнергетического сектора экономики важен с точки зрения прогнозирования надежности и энергообеспечения экономического роста страны.

Проведем количественный анализ прогнозирования динамики основных ресурсов в ТЭК РК по временному ряду за 2010-2017 гг. используя метод гармонических весов. Данный метод предложил польский статистик З. Хелвинг. Основная идея метода выражается в том, что наблюдения временного ряда

взвешиваются таким образом, что более поздним наблюдениям придаются большие веса. Преимущества метода гармонических весов по сравнению с другими методами, в которых также используется взвешивание уровней временного ряда, заключается в том, что при его применении не надо делать никаких предположений относительно вида тренда [3].

В качестве расчетных значений используем данные, приведенные в таб.1. В такой ситуации условно можно принять, что некоторым приближением $\hat{f}(t)$ истинного тренда $f(t)$ является ломаная линия, сглаживающая заданное число точек временного ряда y_t. Изменение положений отдельных отрезков ломаной линии описывает непрерывные изменения в его отдельных фазах [4, 5].

Для определения отдельных фаз движения скользящего тренда выбираем число k<n. Каждая фаза этого движения описывается уравнением. Исходя из того, что предполагается осуществлять среднесрочное прогнозирование, положим k = 5.

В силу неравенства Чебышева получаем:

$$P\{\ |\omega_{t+1} - M(\omega)| > a\sigma_\omega\ \} < 1 / a^2, \qquad (1)$$

где a – заданное целое положительное число.

Характеристика a в приведенном выражении является величиной постоянной. Можно предположить, что при прогнозе величина a будет переменной. Это предположение основано на том, что значения ω_{t+1} коррелированы между собой, т.е. будут хоть и мало, но различаться между собой и незначительно отклоняться от $\overline{\overline{\omega}}$, а эти отклонения будут возрастать по мере удаления влево и вправо от точки t_0 вдоль оси абсцисс. Это означает, что параметр a должен быть функцией отдаленности от l, где l = 0, 1, 2, …, (n-1). Определяется эта функция $a(l)$ по формуле:

$$a(l) = a\sum_{t=1}^{l+1} C_{n-t+1}^{n}\ ,\ l = 0, 1, 2, \ldots, (n-1) \qquad (2)$$

Находим значения $a(l)$, задав число a в неравенстве Чебышева равным 4. Для получения доверительных интервалов рассчитываем произведение $a(l)S_\omega$. Прогнозируемые значения получим по формуле:

$$\bar{y}_{t+1}^{*} = \bar{y}_{t}^{*} + \omega_{t+1}^{*}\ ,\ t = n - l + 1 \qquad (3)$$

а доверительные интервалы – по формуле:

$$\bar{y}_{t+l}^{*} - a(l)S\omega \le \bar{y}_{t+l}^{*} \le \bar{y}_{t+l}^{*} + a(l)S\omega \qquad (4)$$

Результаты всех этих расчетов представлены в таб. 2.

Как следует из модельного представления, объем добычи угля имеет сезонный характер и зависит от режима работы энергопредприятий.

Таким образом, Казахстан можно отнести к ряду государств с избыточными энергоресурсами. Энергетика страны выступает фундаментальной составляющей ресурсной базы экономики. Она же сама представляет мощный сектор экономики, который создает базовую основу для интеграции экономической, социальной и экологической составляющих для дальнейшего устойчивого развития страны в мировую экономику.

Таблица 2

Прогноз динамики основных ресурсов в ТЭК РК на период 2018-2020гг

Виды экономической деятельности	Расчетные параметры трендовых моделей по видам экономической деятельности			
Добыча угля, включая концентрат угольный, тыс. тонн		Уравнения		Моменты времени
	1	$y_1(t)$= 101614,3+ 3450,70t		t=1,2,3,4,5
	2	$y_2(t)$= 94851,20+ 4703,90t		t=2,3,4,5,6
	3	$y_3(t)$= 111212,1+ 1039,30t		t=3,4,5,6,7
	4	$y_4(t)$= 130222,6–2422,70t		t=4,5,6,7,8
	Год	Прогноз	Верхний доверительный интервал	Нижний доверительный интервал
	2018	109224,7	117450,2	100999,2
	2019	107608,3	117981,4	97235,25
	2020	105992,0	117857,6	94126,39
Добыча нефти, включая конденсат газовый, тыс. тонн		Уравнения		Моменты времени
	1	$y_1(t)$= 71019,20+ 2068,60t		t=1,2,3,4,5
	2	$y_2(t)$= 75389,00+ 1014,80t		t=2,3,4,5,6
	3	$y_3(t)$= 78312,80+ 400,80t		t=3,4,5,6,7
	4	$y_4(t)$= 80033,40+ 39,70t		t=4,5,6,7,8
	Год	Прогноз	Верхний доверительный интервал	Нижний доверительный интервал
	2018	80577,59	82467,67	78687,52
	2019	80804,19	83187,73	78420,64
	2020	81030,78	83757,28	78304,27
Производство электроэнергии тепловыми электростанциями, млн. кВт.ч		Уравнения		Моменты времени
	1	$y_1(t)$= 77936,40+ 504,00t		t=1,2,3,4,5
	2	$y_2(t)$= 72995,80+ 1834,10t		t=2,3,4,5,6
	3	$y_3(t)$= 75713,70+ 896,50t		t=3,4,5,6,7
	4	$y_4(t)$= 89085,80–1599,70t		t=4,5,6,7,8
	Год	Прогноз	Верхний доверительный интервал	Нижний доверительный интервал
	2018	74865,12	79547,59	70182,65
	2019	73442,04	79347,05	67537,03
	2020	72018,96	78773,60	65264,32
Производство тепловой энергии, тыс. Гкал		Уравнения		Моменты времени
	1	$y_1(t)$= 90283,90+ 2278,30t		t=1,2,3,4,5
	2	$y_2(t)$= 94041,00+ 769,30t		t=2,3,4,5,6
	3	$y_3(t)$= 111939,4–3474,60t		t=3,4,5,6,7
	4	$y_4(t)$= 125547,2–5683,30t		t=4,5,6,7,8
	Год	Прогноз	Верхний доверительный интервал	Нижний доверительный интервал
	2018	75492,78	83025,80	67959,76
	2019	70904,76	80404,56	61404,96
	2020	66316,74	77183,41	55450,07

* Таблица составлена на основе расчета.

Литература

1. Концепция и Стратегия развития устойчивой энергетики будущего Казахстана до 2050. Астана, 2013.
2. Саткалиев А.М. Экономические приоритеты развития энергетики Казахстана //Сегодня и завтра Российской экономики. 2011. №47. С. 193.
3. Экономико-математические методы и прикладные модели: Учеб. пособие для вузов/ Федосеев В.В., Гармаш А.Н., Дайитбегов Д.М. и др.; Под ред. Федосеева В.В. – М.: ЮНИТИ,2000. – 391с.
4. Саткалиев А.М. Экономические приоритеты развития энергетики Казахстана //Сегодня и завтра Российской экономики. 2011. №47.
5. Hellwing Z. Schemat budowy prognozy staticznej metoda wag harmonicznych. Przeglad Statystyczny. R. XIV. No. 2. 2007. P. 133-153.

УДК 681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ ЭНТРОПИЙНОГО ПОТЕНЦИАЛА

В.Л. Лазарев, В.О. Веденский

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

holod25@yandex.ru

Аннотация
В работе предложены варианты моделей для получения оценок изменений состояний неопределенности на основе понятий энтропийного потенциала и описаны условия и области их применения. Модели являются компактными и удобными для проведения оперативного мониторинга и организации управления системами различной природы. Достоинством предлагаемых решений является то, что получение соответствующих оценок может быть осуществлено на основании ограниченных объемов результатов наблюдений анализируемых параметров.
Ключевые слова
Состояния неопределенности, энтропийный потенциал, математические модели.

Теория энтропийных потенциалов (ТЭП) получает все большее распространение для решения задач мониторинга и управления различными системами [1 – 4]. На основе ТЭП разработаны методы контроля эволюционных процессов состояний неопределенности с использованием информационных и энтропийных портретов [4 – 6]. Для внедрения таких разработок актуальным является совершенствование методик оперативного определения оценок изменений энтропийных потенциалов в различных ситуациях.

Для описания состояний неопределенности систем на разных уровнях «сложности» разработан набор понятий энтропийных потенциалов, взаимосвязанных на основе принципа «вложения». Базовым является понятие энтропийного потенциала (ЭП) – Δ_e, которое определяется через характеристики «вариативных» свойств анализируемого параметра следующим образом

$$\Delta_e = \sigma K_e, \qquad (1)$$

где σ – величина среднеквадратического отклонения (СКО), K_e–энтропийный коэффициент закона распределения параметра. Другие понятия энтропийных потенциалов вводятся на основе понятия ЭП, за счет учета дополнительных характеристик. Достоинством понятия ЭП является то, что на его основе можно строить вышеуказанные портреты изменений состояний неопределенности систем [4 – 6]. Поэтому в данной работе рассматриваются частные вычислительные модели для нахождения значений ЭП в реально возможных ситуациях при проведении исследований. Проблемы синтеза обобщенных вычислительных моделей для различных вариантов энтропийных потенциалов и пути их решения рассмотрены в работах [4 – 6]. При исследовании изменений состояний неопределенности системы

анализируются приращения величины Δ_e между различными этапами ее функционирования.

Рассмотрим варианты получения вычислительных моделей приращений величины ЭП исходя из определения (1). Приращение величины ЭП - $\delta\Delta_e$ может быть приближенно определено через дифференциал $d\Delta_e$ при замене дифференциалов аргументов на их реальные приращения δK_e и $\delta\sigma$, то есть

$$\delta\Delta_e \approx d\Delta_e \approx \frac{\partial\Delta_e}{\partial K_e}\delta K_e + \frac{\partial\Delta_e}{\partial\sigma}\delta\sigma = \sigma\delta K_e + K_e\delta\sigma, \quad (2)$$

Из (2) можно получить различные варианты приближенных вычислительных моделей. Возможно представление (2) одним доминирующим слагаемым. Если из каких-либо соображений (эвристических, физических и др.), известно, что для сравниваемых этапов имеет место соотношение

$$|\sigma\cdot\delta K_e| \,\pi\, |K_e\cdot\delta\sigma|, \quad (3)$$

то выражение (2) может быть упрощено до вида

$$\delta\Delta_e \approx K_e\cdot\delta\sigma, \quad (4)$$

Модель (4) является более простой и компактной, при ее использовании требуется меньший объем исходных данных, чем для (2).

Определим области применимости модели (4). Так как величины K_e и σ являются положительными, то выражение (3) может быть преобразовано к виду

$$\frac{|\delta\sigma|}{\sigma}\,\phi\,\frac{|\delta K_e|}{K_e}, \quad (5)$$

Найдем максимальное значение выражения в правой части (5) исходя из следующих соображений. Реальный диапазон изменения величины энтропийного коэффициента описывается условием [1, 6, 7].

$$1 \le K_e \le 2.07 \text{ , или } K_e(min) = 1.00; K_e(max) = 2.07, \quad (6)$$

Следовательно, максимальное значение правой части (5) будет иметь место в случае когда

$$\delta K_e = \delta K_e(max) = K_e(max) - K_e(min) = 2.07 - 1.00 = 1.07; K_e = K_e(min), \quad (7)$$

Таким образом, максимально возможное значение величины относительного приращения энтропийного коэффициента будет равно

$$\left(\frac{|\delta K_e|}{K_e}\right)(max) = \frac{|\delta K_e|(max)}{K_e(min)} = \frac{1.07}{1.00} = 1.07, \quad (8)$$

Используя полученное значение (8) в правой части неравенства (5) получим условие применимости модели (4) в виде ограничения на величину относительного приращения СКО

$$\frac{|\delta\sigma|}{\sigma} \phi 1.07, \tag{9}$$

Адекватность модели (4) можно повысить путем увеличения «кратности» неравенства (3) с помощью коэффициента q $(q \geq 1)$ в виде

$$q|\sigma\delta K_e| \pi |K_e\delta\sigma|, \tag{10}$$

Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [6].

Для другой ситуации, когда имеет место доминирование первого слагаемого в выражении (2) т.е.

$$|\sigma\delta K_e| \phi |K_e \cdot \delta\sigma|, \text{ или } \frac{|\delta\sigma|}{\sigma} \pi \left(\frac{|\delta K_e|}{K_e}\right)(min), \tag{11}$$

приращение величины ЭП может быть определено по первому слагаемому выражения (2), т.е.

$$\delta\Delta_e \approx \sigma\delta K_e, \tag{12}$$

Минимальное значение величины относительного приращения энтропийного коэффициента зависит от особенностей функционирования системы и, в пределе, может быть равно нулю (когда $\delta K_e = 0$). Поэтому, в общем случае, точно указать область применимости модели (12) не представляется возможным. Для конкретных систем и их особенностей, в ряде случаев, можно выделить характерные этапы эволюции, характеризующиеся граничными или реперными значениями величины $\left(\frac{|\delta K_e|}{K_e}\right)(min)$. В дальнейшем, на основании этих значений, следует осуществлять выбор варианта модели. Из (11) следует, что эффективность использования модели (12) будет возрастать при наличии тенденции уменьшения приращений величины $\frac{|\delta\sigma|}{\sigma}$ на рассматриваемых этапах.

Если слагаемые в (2) соизмеримы по «весу» то приращение величины $\delta\Delta_e$ адекватно может быть определено только с использованием полной модели приращений (2). Условие для применения этой модели будет иметь вид

$$\left(\frac{|\delta K_e|}{K_e}\right)(min) \leq \frac{|\delta\sigma|}{\sigma} \leq 1.07, \tag{13}$$

Использование предложенных решений будет способствовать повышению оперативности проведения исследований, что является актуальной задачей [1, 4, 8].

Литература

1. Мягкие измерения и вычисления. Монография в 3-х томах. / Под ред. проф. Прокопчиной С.В. Том 1. Теоретические основы и методы. – М.: ИД «НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА», 2017. – 420 с.
2. Лазарев В.Л. Оптимизация управления на основе понятий энтропийных потенциалов. /Сб. докладов XX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM-2017». С-Пб., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. Т.1, С. 49-52.
3. Домбровский М.А., Буторина О.В. Анализ энтропийного потенциала инфраструктуры региона на примере Пермского края // Экономика и предпринимательство. 2015. №5-1 (58-1). С. 305–310.
4. Лазарев В.Л. Совершенствование управления с использованием характеристик энтропийных потенциалов. Адаптация к специфике биотехнологической промышленности // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 68-73.
5. Lazarev V.L. Processing of observations on the basis of information criteria // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. Saint Petersburg, RUSSIA. Publisher: IEEE. Pp. 48 – 50. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519679.
6. Лазарев В.Л. Робастные модели состояний неопределенности систем на основе понятий энтропийных потенциалов. /Сб. докладов XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM-2018». С-Пб., 23-25 мая 2018 г. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. Т.1, С. 11-14.
7. Электрические измерения неэлектрических величин. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др./ Под ред. Новицкого П.В. – Л.: «Энергия», 1975. – 576 с.
8. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

УДК 687.023

СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

В.В. Сигачёва

Государственный университет промышленных технологий и дизайна,
Санкт-Петербург, Россия.

E-mailsigacheva2006@mail.ru

Аннотация
Разработана система управления сушильной камерой, выполняющая одновременное управление двумя исполнительными механизмами с учетом общего изменения входных параметров – температуры, влажности по программе, написанной на основе нечеткого моделирования.

Ключевые слова
Сушильная камера, температура, влажность, нечеткое моделирование, измерительный блок, микроконтроллер, программа.

В различных отраслях промышленности, включая пищевую, сушка продукта с одновременным удержанием определенной влажности, например для хлебобулочных изделий, является обязательным элементом технологии изготовления, а часто определяющим конечное качество изделия. Для крупносерийных производств выпускаются сушильные установки высокой производительности. Для мелкосерийного производства требуются малогабаритные установки меньшей производительности с меньшими затратами электроэнергии типа автоматизированных сушильных шкафов со встроенными регуляторами.

Сушка является процессом диффузионным, т.к. влага из материала в окружающую среду переходит при поверхностном испарении и диффузии ее из внутренних слоев к поверхности материала. Процесс сушки можно условно разделить на периоды: в первом периоде при достижении определенной температуры влага интенсивно испаряется с открытой поверхности и крупных пор. Для удаления влаги из внутренних слоев требуется дополнительное, но более медленное нагревание. При дальнейшем нагревании удаляется сорбционная влага, прочно связанная с материалом. При равенстве температур и влажности материала и воздуха в сушилке наступает равновесное состояние, сушка закончена.

Для создания оптимального режима, при котором длительность сушки и расходы энергии наименьшие, а свойства высушиваемого материала соответствуют предъявляемым к ним требованиям, рациональна разная скорость повышения температуры и изменения влажности изделия в разные временные периоды обработки.

Объектом управления является сушильная камера. Изменение состояния камеры зависит от температуры внешней среды, загружаемых изделий, технологии изготовления. Источником тепла является нагреватель. Вентилятор с регулируемой скоростью вращения крыльчатки, изменяя скорость перемещения нагретого воздуха, изменяет влажность высушиваемого продукта. Диапазон температуры в камере может изменяться от 10 до 120°С. Заданная температура может принимать значения в пределах 60 – 90°С. Влажность продукта RH изменяется в пределах 20 – 90%, заданная влажность составляет 50 %. Потребная мощность нагревателя и скорость вращения вентилятора могут изменяться в процессе сушки технологического продукта. Мощность нагревателя изменяется от 0 до 2 кВт, а скорость вращения крыльчатки вентилятора изменяется от 0 до 1000 об/мин.

Задачей описываемого устройства является реализация нечеткой системы управления температурой и влажностью воздуха в камере для сушки технологического продукта.

С учетом влияния всех факторов система управления характеризуется неопределенностью. Рациональна разработка модели нечеткого управления в среде Matlab с использованием нечеткой логики и теории нечетких множеств, в приложении Fuzzy Logic Toolbox [1]. Четкие входные величины – температура (t) и влажность сушки (w), а также выходные величины – мощность нагревателя (Q) и скорость вентилятора (v) в процессе фаззификации заменяются лингвистическими переменными, которые вводятся каждая в виде трех нечетких множеств, образуемых кусочно - линейными функциями принадлежности. Количество нечетких множеств и типы функций могут быть различными. Выбор определяется типом описываемого процесса. Количество входных функций определяет количество правил базы. Важно так формировать термы нечетких множеств, чтобы во всем диапазоне существования лингвистической переменной сумма ординат термов была равна единице.

Пример представления температуры в виде лингвистических переменных после фаззификации приведен на рис. 1.

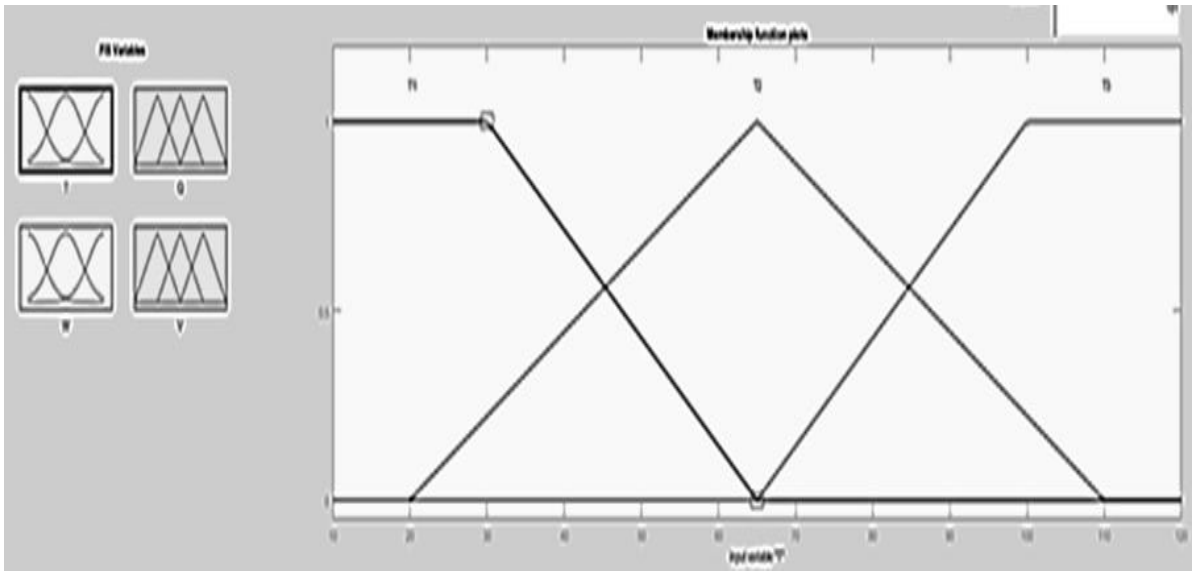


Рис. 1. Представление температуры в виде лингвистических переменных

Процесс управления описывается базой правил. Система управления, создаваемая на основе «нечеткого вывода», является по сути экспертной системой, моделируемой с использованием нечеткой логики. База правил составляется на основании априорного опыта работы с такими системами, знания о реакции параметров объекта на изменение управляющих воздействий.

После составления правил программа обрабатывает лингвистические переменные в соответствии с выбранным алгоритмом Мамдани.

Результаты нечеткого моделирования можно оценить по графическим 3D представлениям. На рис. 2 приведена зависимость мощности нагревателя от температуры и влажности воздуха в сушильной камере.

Следует отметить, что система очень чувствительна к корректированию правил. База правил вводится с помощью редактора правил (edit – rules). Правила составляются по логике «**если** входные переменные имеют (лингвистические) определенные значения, **то** управляющие лингвистические переменные должны им соответствовать по смыслу».

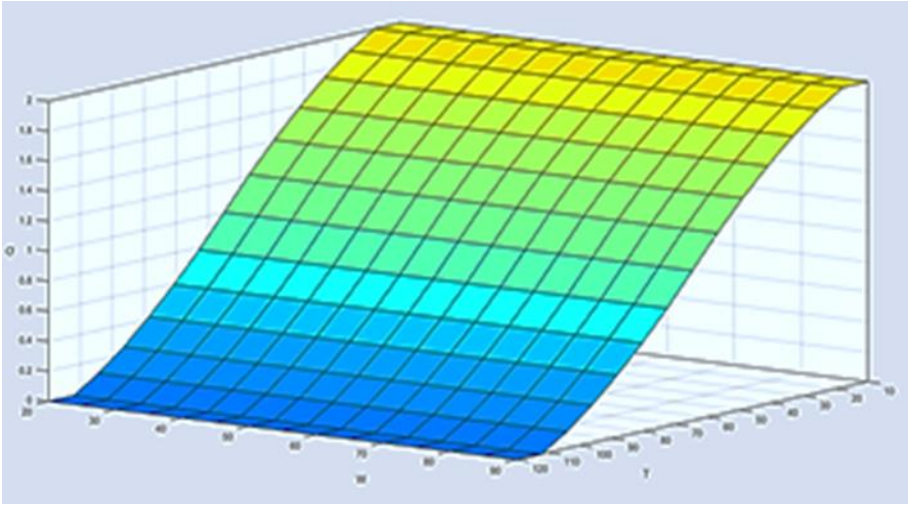


Рис. 2. Зависимость потребления мощности нагревателя от температуры и влажности воздуха в сушильной камере

Результаты моделирования выводятся также в 2D представлении, содержащем более подробную информацию об управлении на каждом шаге изменения входных параметров. Программа на языке FCL, написанная по результату нечеткого моделирования вводится в управляющий микроконтроллер.

Структурная схема системы, позволяющая реализовать модель нечеткого управления температурой воздуха и влажностью в сушильной камере, представлена на рис. 3.

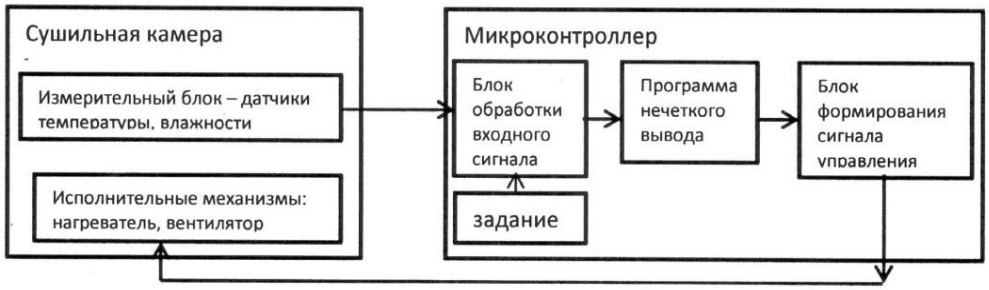


Рис. 3. Структурная схема системы управления

Она включает объект управления – сушильную камеру, где установлен блок датчиков температуры и влажности воздуха в камере, нагреватель и вентилятор; микроконтроллер (МК), в котором выделены программные блоки: обработки входного сигнала, системы нечеткого вывода, формирования сигнала управления – усилителей мощности.

Микроконтроллер в соответствии с заданной программой нечеткого управления обрабатывает входные данные и определяет настройку мощности электрического нагревателя и скорости вентилятора.

Работа системы происходит следующим образом. После загрузки новой партии изделий оператор задаёт необходимый диапазон параметров посредством задатчика. Заданный диапазон параметров поступает в блок обработки входного сигнала МК, одновременно с этим в МК поступает сигнал с датчиков. В блоке обработки входного сигнала происходит преобразование токовых сигналов с датчиков и расчет скорости изменения температуры, если это предусмотрено. Преобразованные входные сигналы обрабатываются программой нечеткого вывода, которая реализует этапы нечеткого

вывода в соответствии с выбранным алгоритмом [1]. Разработка по результатам моделирования программы управления на языке FCL остаточно проста, и она может быть использована в современных микропроцессорах, что существенно ускоряет процесс разработки программы управления. Программно вырабатываются соответствующие управляющие воздействия, поступающие в блок формирования сигнала управления, где осуществляется усиление сигнала по мощности подача выходного сигнала на нагреватель и двигатель вентилятора.

Таким образом, нечеткое моделирование алгоритма и программы системы управления в среде Matlab в приложении Fuzzy Logic Toolbox сокращает сроки разработки. Эта программа позволяет разрешать неопределенность системы, повышает точность работы.

Литература

1. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 352 с.

УДК 687

СТРУКТУРА МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Т.Л. Тен[1], В.Л. Иванов[2], Г.Д. Когай[3], В. Г. Дрозд[1], А.Л. Те[4]

1 – Карагандинский экономический университет, г. Караганда, Респ. Казахстан
2 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
3 – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Респ. Казахстан
4 – Алматинская академия экономики и статистики, г. Алматы, Респ. Казахстан

tentl@mail.ru, vlivanov@itmo.ru

Аннотация
В работе рассмотрены особенности использования технологии применения силового воздействия сервоприводов на компоненты манипулятора в соответствии с контролирующими сигналами от устройства управления роботом. Приводится рассмотрение решения обратной задачи кинематики манипуляторов робота-манипулятора при контурном управлении. В результате решения обратной задачи формируется описание зависимостей в аналитической и табличной форме.
Ключевые слова
Кинематическая пара, концевое звено, мобильное соединение, контурное управление, манипулятор, обратная задача, система координат, математическое программирование.

Введение

Робот – сложное техническое устройство, созданное на основе мехатронного метода, состоящее из манипулятора и устройства управления и предназначенных для транспортировки предметов труда в трёхмерном пространстве. В роботизированных манипуляторах используются одиночные вращательные или поступательные кинематические пары пятого класса [1].

Силовые воздействия сервоприводов на компоненты манипулятора формируются в соответствии с контролирующими сигналами от устройства управления роботом, которые, в то же время, образуются согласно заданному движению захвата, а также с учетом положения робота и окружающей технологической обстановки. При воздействии сервоприводов робота звенья манипулятора и его схват будут производить совершенно определенные движения в пространстве.

Основная часть

В роботе для осуществления двигательных функций используется манипулятор, который представляет собой серию кинематических связей, соединенных вместе кинематическими парами (рис. 1).

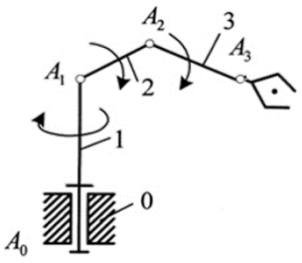


Рис. 1. Манипулятор на основе разомкнутой цепи

Одно из звеньев стабильно и неподвижно, в то время как другие могут делать контролируемые движения из-за влияния приводов.

Робот-манипулятор может быть сформирован как по принципу открытой кинематической цепи (рис. 2) с последовательными связями (антропоморфными человекоподобными роботами), так и на основе замкнутой кинематической цепочки (рис. 3) с последовательно-параллельным соединением (робот с параллельной кинематикой, в частности, гексаподы на платформе Стюарта) [2].

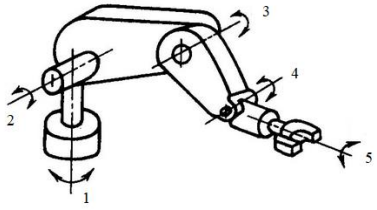


Рис. 2. Манипулятор на основе разомкнутой цепи

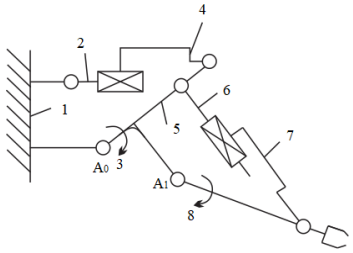


Рис. 3. Манипулятор с параллельной кинематикой

Манипулятор представляет собой механизм, который представляет собой замкнутую или открытую кинематическую цепь, используемую для получения требуемого захвата в пространстве.

Законы преобразования трансформации зависят от характера кинематических пар и от их относительного положения в манипуляторе.

Кинематические пары допускают определенные движения частей, образующих их относительно друг друга. Данная определенность создаётся ограничениями, получаемыми парами геометрии их элементов.

Пары классифицируются по классам, число которых равно количеству ограничений (количество условий связи), налагаемых этой парой:

– 1 ограничение (1 условие соединения) - пара I класса;

– 2 ограничения (2 условия связи) - пара классов II;

– 3 ограничения (3 условия связи) - пара классов III;

– 4 ограничения (4 условия соединения) - пара классов IV;

– 5 ограничений (5 условий связи) - пара классов V (пары 5-го класса могут быть трансляционными и вращательными) [3].

Одной из важных характеристик манипулятора является количество степеней подвижности, количество степеней свободы.

В произвольной кинематической цепочке следует применять формулу Сомова-Малышева.

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum_{i=1}^{i=5} ip_i, \qquad (1)$$

где p_i – количество кинематических пар i-го класса.

Для роботов-манипуляторов с кинематическими парами 5- го класса [4]

$$W = 6n - 5p_5, \tag{2}$$

Решение обратной задачи кинематики манипуляторов это одна из главных задач динамического и кинематического анализа и синтеза манипуляторов.

Обратная задача решается контурным управлением робота, в случае когда схват должен двигаться по траектории, определенной во времени и пространстве, и заключается в нахождении величин обобщенных координат манипулятора в соответствии с заданной позицией захвата.

Пусть задан закон движения захвата, т.е. приведены правила изменения его координат и углов ориентации:

$$\left.\begin{array}{lll} x_{0n} = x_{0n}(t); & y_{0n} = y_{0n}(t); & z_{0n} = z_{0n}(t) \\ \widehat{x_0 z_n} = f_1(t); & \widehat{y_0 z_n} = f_2(t); & \widehat{x_0 y_n} = f_3(t) \end{array}\right\} \tag{3}$$

Следовательно, можно определить матрицу-задатчик положений и ориентации схвата.

$$T_{0n}^{\Pi} = \begin{vmatrix} a_{11}^{\Pi}(t) & a_{12}^{\Pi}(t) a_{13}^{\Pi}(t) & a_{14}^{\Pi}(t) \\ a_{21}^{\Pi}(t) & a_{22}^{\Pi}(t) a_{23}^{\Pi}(t) & a_{24}^{\Pi}(t) \\ a_{31}^{\Pi}(t) & a_{32}^{\Pi}(t) a_{33}^{\Pi}(t) & a_{34}^{\Pi}(t) \\ 0 & 0 \quad 0 & 1 \end{vmatrix}, \tag{4}$$

где

$$a_{12}^{\Pi}(t) = cos[\widehat{x_0 y_n}];\ a_{13}^{\Pi}(t) = cos[\widehat{x_0 z_n}];\ a_{23}^{\Pi}(t) = cos[\widehat{y_0 z_n}]; \tag{5}$$

$$a_{14}^{\Pi}(t) = x_{0n}(t);\ a_{24}^{\Pi}(t) = y_{0n}(t);\ a_{34}^{\Pi}(t) = z_{0n}(t). \tag{6}$$

Предположим, что в некоторый k-ый момент времени t_k (k=0,…,K) заданное положение схвата: $a_{12}^{\Pi,k}(t_k), a_{13}^{\Pi,k}, \dots, a_{34}^{\Pi,k}(t_k)$ совпадает с его фактическим положением, поддерживаемым текущими величинамиq_i^k обобщенных координат [5]. Тогда:

$$T_{0n}^{\Pi,k}(t_k) - T_{0n}^{Q,k}\left(q_1^k, \dots, q_n^k; t_k\right) = 0, \tag{7}$$

Значит $a_{12}^{\Pi,k}(t) - a_{12}^{\Pi,k} = 0,\ a_{13}^{\Pi,k}(t) - a_{13}^{\Pi,k} = 0, \dots, a_{34}^{\Pi,k}(t) - a_{34}^{\Pi,k} = 0.$ (8)

Обобщенные координаты, при которых достигается эквивалентность матрицT_{0n}^{Π}иT_{0n}^{Q},принимается за значениеq_i^{k+1}, соответствующий времени t_{k+1}.

После этого (k +1) -я позиция берется как k-й и следующая новая позиция манипулятора, то есть несоответствие снова вводится в полученное равенство, которое следует устранить после определения следующих значений обобщенных координат. Это продолжается до того момента, когда значения не будут определены для каждых обобщенных координат, требуемых положениями К манипулятора на заданной траектории.

Определим критериальную функцию. Поскольку целью решения является нахождение таких значений обобщенных координат, для которых разница между данным положением захвата и его фактическим положением была равна нулю, параметр, отражающий эту разницу, следует принимать в качестве критерия.

В связи с этим для автоматического исполнения вероятного диапазона изменений обобщенных координат вводятся функции штрафа в форме следующих ограничений на значения q_i:

$$F_i^1 = \begin{vmatrix} 0, \text{если } q_i - q_i^{min} \geq 0; \\ W_i^1\left(q_i^{min} - q_i\right), \text{если } q_i - q_i^{min} < 0, \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$F_i^2 = \begin{vmatrix} 0, \text{если } q_i^{max} - q_i \geq 0; \\ W_i^2(q_i - q_i^{max}), \text{если } q_i^{max} - q_i < 0, \end{vmatrix} \quad (10)$$

где W_i^1, W_i^2 – веса штрафных функций, которые могут регулировать их наклон [6].

В дополнение к этим возможны другие ограничения.

В роли целевой функции можно применить функцию, которая является суммой функции критерия и функции частного штрафа:

$$K(q_1, \dots, q_n) = \Delta + \sum_{i=1}^{i=n} F_i^1 + \sum_{i=1}^{i=n} F_i^2. \quad (11)$$

Возьмем в качестве способа нахождения новых значений обобщенных координатq_iметод градиента, который выражается следующим соотношением:

$$q_i^{m+1} = q_i^m - h_i \cdot \frac{\Delta\left(q_1^m, \dots, q_i^m + \Delta q_i, \dots, q_n^m\right) - \Delta\left(q_1^m, \dots, q_i^m, \dots, q_n^m\right)}{\Delta q_i}, \quad (12)$$

где h_i– шаг по i-й обобщенной координате; Δq_i –малое приращение i-й обобщенной координаты, применяемое при нахождении частной производной по q_i.

Необходимо отметить, что старое значение q_i^k используется как первое приближение$q_i^m(m = 1)$, т. е. в начальный момент предполагается $q_i^1 = q_i^k$.

Вычислительный процесс приближающихся значений q_i^{k+1}может быть прерван любым атрибутом, используемым в нелинейном программировании. В частности, он может быть дополнен здесь условием $\left|q_i^{m+1} - q_i^m\right| \leq [\delta_i]$, здесь δ_i–значение отклонения i-й обобщенной координаты, допускаемой точностью воспроизведения траектории.

Учитывая характер функции (6), окончательное значение следует принять за:

$$q_i^{k+1} = 0{,}5 \cdot (q_i^{m+1} + q_i^m). \quad (13)$$

Заметим, что (m+1)-й шаг к (k+1)-й точке в процессе вычисления может быть выполнен с использованием различных алгоритмов, характерных для методов нелинейного программирования. При использовании и надлежащем методе градиента (m+1)-ый шаг выполняется одновременно по всем координатам после вычисления ориентации движения антиградиента.

Для этого мы будем использовать центральную разность.

Тогда: $\dot{q_i^k} = \frac{q_i^{k+1} - q_i^{k-1}}{2 \cdot \Delta t}$; $\ddot{q_i^k} = \frac{q_i^{k+1} - 2 \cdot q_i^k + q_i^{k-1}}{\Delta t^2}$. (14)

Таким образом, функции $\dot{q}_i^k$, $\ddot{q}_i^k$ также будут получены в табличном виде. Чтобы сформировать управляющее действие в качестве непрерывных функций, а не табличных, важно приблизить табличные значения обобщенных координат, скоростей и ускорений. Для этого мы можем использовать, например, формулу интерполяции Лагранжа:

$$q_i(t) = q_i^0 \cdot \frac{(t-t_1)\cdot(t-t_2)\cdot\ldots\cdot(t-t_K)}{(t_0-t_1)\cdot(t_0-t_2)\cdot\ldots\cdot(t_0-t_K)} + \; + q_i^1 \cdot \frac{(t-t_0)\cdot(t-t_2)\cdot\ldots\cdot(t-t_K)}{(t_1-t_0)\cdot(t_1-t_2)\cdot\ldots\cdot(t_1-t_K)} + \\ + q_i^2 \cdot \frac{(t-t_0)\cdot(t-t_2)\cdot\ldots\cdot(t-t_K)}{(t_2-t_0)\cdot(t_2-t_1)\cdot\ldots\cdot(t_2-t_K)} + \cdots + \; + q_i^K \cdot \frac{(t-t_0)\cdot(t-t_2)\cdot\ldots\cdot(t-t_{K-1})}{(t_K-t_0)\cdot(t_K-t_1)\cdot\ldots\cdot(t_K-t_{K-1})}. \quad (15)$$

Выводы

В итоге была найдена непрерывная функция $q_i(t)$, которая будет проходить через точки q_i^k в фиксированные моменты времени k.

Литература

1. Новиков В.А. Электропривод в современных технологиях / Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И., под ред. Новикова В.А. – М: Академия, 2014. 400 с.
2. Иванов А.А. Основы робототехники: учеб. пособие / Иванов А.А.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2011. 200 с.
3. Павлов А.Н., Никифоров С.О. Требования к перемещениям объектов манипулирования и способы реализации устройств для их перемещений // Вестник машиностроения. 2006. – №3. – С. 14-18.
4. Борисов О.И. Методы управления робототехническими приложениями. учеб. Пособие / Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Университет ИТМО, 2016. 108 с.
5. Featherstone R., Orin D., Robot Dynamics: Equations and Algorithms, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000.
6. Biagiotti L., Melchiorri C., Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots, Springer, 2008.

КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)

УДК 629.1

ОБОСНОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ СПГ

А.В. Анохин, А.В. Зайцев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

anokhin.andreyy@gmail.com, zai@inbox.ru

Аннотация
В настоящее время вопрос газификации регионов России остается актуальным. Ввиду стремительного развития СПГ-технологий появляется возможность использования его не только на экспорт, но и на внутреннем рынке страны. Наиболее целесообразно применение данных технологий для газификации отдаленных регионов, в которых использование трубопроводного транспорта затруднительно.
Ключевые слова
Газификация, СПГ-терминал, хранение.

Увеличение процента газификации субъектов – актуальный вопрос, который находит свои пути решения. Для отдаленных регионов сложность данного решения заключается в необходимости развития инфраструктуры практически с нуля. Например, процент газификации респ. Саха находится на уровне 20,2% при средних 62% по России в целом [1].

Намеченный запуск магистрального трубопровода «Сила Сибири» в 2019 г. соединит Ковыктинское и Чаядинское месторождения, однако строительство распределительных газопроводов потребует еще бóльших капиталовложений. Расположение данного газопровода на юге региона так же означает трудности в обеспечении его северной части.

Отсюда появляется возможность использования сжиженного природного газа (СПГ), уже производящегося на севере, для обеспечения газом северных зон региона, а также для компенсации повышенного зимнего спроса на отопление на юге вместо подземных хранилищ газа (ПХГ).

Так, поставки СПГ могут осуществляться по крупным Сибирским рекам, таким как Енисей, Обь и Лена. Выстраивая логистическую схему, можно выделить основные её составляющие (рис. 1).

В качестве поставщика идеальным вариантом будет «Ямал-СПГ», проект компании ПАО «Новатэк» (50,1%) при поддержке Total (20%) и CNPC (20%), который уже имеет свой морской танкерный флот. Вместимость парка резервуаров 640 тыс. м^3, действующая мощность – 8,8 млн т с планируемым расширением до 16,5 млн т [2].

Рис. 1. Основные звенья логистической схемы

В качестве поставщика идеальным вариантом будет «Ямал-СПГ», проект компании ПАО «Новатэк» (50,1%) при поддержке Total (20%) и CNPC (20%), который уже имеет свой морской танкерный флот. Вместимость парка резервуаров 640 тыс. м^3, действующая мощность – 8,8 млн т с планируемым расширением до 16,5 млн т [2].

«Ямал СПГ» – интегрированный проект по добыче, сжижению и поставкам природного газа, что максимально сокращает транспортную составляющую цены на топливо

В качестве дальнейшего сплавления по рекам будет необходимо использовать танкеры класса река-море от местного судоходства, например, «Ленского объединенного речного пароходства». Однако суда данной компании были построены в 70-х и 80-х годах прошлого столетия, что поднимает вопрос возможного строительства новых модернизированных под необходимые системы хранения груза (СПГ) моделей кораблей в сочетании со старыми корпусами.

Строительство терминалов по приёмке СПГ очень тесно соприкасается с вопросами хранения. Выбор типа терминала в данном случае будет стоять между береговым и плавучим, в зависимости от объёмов спроса потребителей.

Береговой терминал имеет бóльшую ёмкость (с возможностью дальнейшего её увеличения) и более безопасен в своей эксплуатации, однако его капитальные и эксплуатационные затраты гораздо выше.

В случае выбора плавучего терминала, корабли класса река-море могут заправляться, не заходя в порт, что будет освобождать северный морской путь от лишней загруженности, ведь, согласно планам Правительства РФ, для порта Тикси планируется реконструкция с увеличением грузооборота до 80 млн т.

Вне зависимости от выбора типа данный терминал будет использоваться в качестве перевалочного пункта для дальнейшего распределения топлива в ближайшие регионы и населенные пункты.

Вопрос дальнейшего расположения хранилищ СПГ в точках наибольшего спроса потребителей является ключевым для данной схемы. В зависимости от необходимых объёмов газа для снабжения ближайших населенных пунктов и промышленных потребителей, могут быть использованы различные типы резервуаров, подходящие под малотоннажные (100-20 000) и среднетоннажные (рис. 2) (20 000-160 000 м^3) объёмы приёмочных терминалов [2, 3].

Таким образом, выбор будет стоять между установкой резервуаров с плоским дном (flat-bottom), ёмкостью 7500-160 000 м^3 и небольшого парка цилиндрических танков (bullet tanks) объёмом до 1200 м^3 [3, 4].

Благодаря возможности повышения давления в цилиндрических резервуарах, количество отпарного газа может быть уменьшено, что означает отсутствие необходимости установки компрессора.

Также для данных резервуаров отсутствует необходимость постоянного мониторинга за утечками СПГ в случае установки двойного экрана из криогенной стали. Обвалование может устанавливаться вокруг парка резервуаров при необходимости. Однако данный вид хранения существенно проигрывает по объёму

хранимого СПГ. Сравнение основных показателей двух типов резервуаров приведено в таблице.

Таблица

Сравнение типов резервуаров

Тип хранилища	Цилиндрические танки (bullet tanks)	Резервуары с плоским дном (flat-bottom)
Емкость	Один танк 100-1200 м^3 Несколько танков 100-20 000 м^3	7500-160 000 м^3
Количество отпарного газа	0,05-0,15% в день	0,05% в день
Давление	0,5-8 бар (избыточное)	атмосферное
Мониторинг утечек СПГ	Нет	Да
Способ строительства	Полный сбор на заводе	На месте установки
Время строительства на месте	От нескольких дней до пары недель	18-36 месяцев

Дополнительным условие – способ установки цилиндрических резервуаров. Существует возможность вертикального и горизонтального их исполнения:

Вертикальные резервуары:

- Занимают меньшую площадь;
- Более тяжелое основание (фундамент);
- Объём до 300 м^3;

Горизонтальные резервуары:

- Покрываемая площадь соизмерима с площадью резервуаров с плоским дном;
- Объём до 1200 м^3 на каждый резервуар (рис. 2).

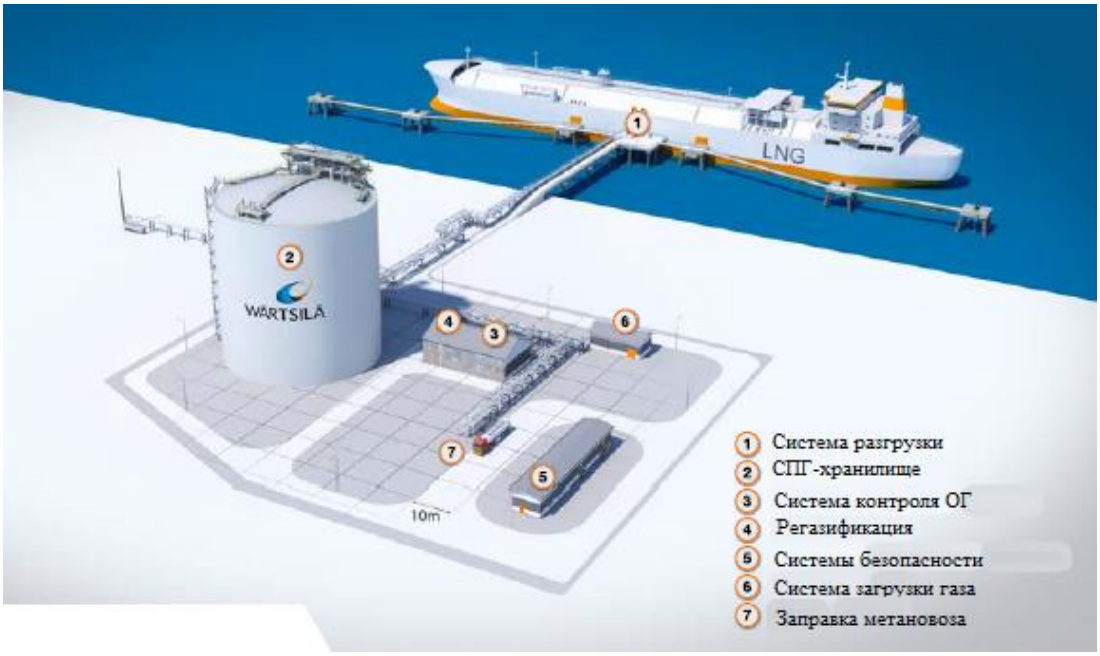


Рис. 2. Схема среднетоннажного СПГ-терминала [4]

После заполнения резервуаров, снабжение газом населенного пункта будет осуществляться путём регазификации СПГ и поставок по местной газораспределительной сети. Другой вариант дальнейших поставок – заправка автомобильных цистерн и снабжение сел и небольших городов вокруг терминала в радиусе 1,5-2 км.

Применение автомобильного транспорта СПГ целесообразно и в качестве топлива, что ускорит окупаемость проекта ввиду снижения эксплуатационных затрат. Расход СПГ меньше, чем у дизельных топлив, а его стоимость ниже. А значит, чем большее расстояние покрывается при помощи автомобильного транспорта, тем больше экономия на топливе [5].

В качестве дальнейшей работы по данной тематике будет осуществлен подбор всех частей логистической схемы, основываясь на потребностях города Ленск, который достаточно удалён от устья Лены, и имеет необходимый док, который входит в маршрутную карту «Ленского объединенного речного пароходства».

Оценка эффективности логистической схемы требует оценки будет осуществляться сравнением стоимости СПГ, поставляемого речным транспортом, с ценами на природный газ, который поставляется при помощи трубопроводного транспорта в газифицированных городах и его стоимостью. Ближайшие города и сёла, снабжаемые от резервуаров в Ленске при помощи автомобильного транспорта, будут сопоставлены с проектами, использующим магистральный газ для сжижения от ГРС.

Литература

1. Программа развития газоснабжения и газификации Республики Саха (Якутия) на период с 2016 по 2025 годы: [Электронный ресурс] // Министерство промышленности и геологии Республики Саха (Якутия). 2016. URL: https://minprom.sakha.gov.ru/gazifikatsija/ programma-razvitija-gazosnabzhenija-i-gazifikatsii-respubliki-saha-jakutija-na-period-s-2016-po-2025-gody//дата обращения 11.05.2019.
2. Официальный сайт проекта «Ямал-СПГ»: [Электронный ресурс] // ПАО «Новатэк». Т-С, 2015, URL: http://yamallng.ru// 11.05.2019.
3. Small scale LNG: [Электронный ресурс] // International Gas Union. 2015. URL: https://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/SmallScaleLNG.pdf//10.04.2019.
4. Small- and medium-scale LNG terminals: [Электронный ресурс] // Wärstilä. 2018. URL: https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/lng/small-and-medium-scale-lng-terminals_wartsila.pdf?sfvrsn=2171ba45_6// 03.03.2019.
5. Sustainable transport with LNG trucks: [Электронный ресурс] // VOS-logistics. 2016. URL: https://www.voslogistics.com/sites/default/ files/assets/files/Vos %20Logistics% 20Whitepaper%20LNG%20EN%20(web).pdf// 05.04.2019.

УДК 621.59

ЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ЗОНЫ WBC, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

А.Ю. Баранов, А.В. Василенок

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vasilenok_anna@mail.ru

Аннотация
В статье приводится история развития технологии общего криотерапевтического воздействия на человека. Оборудование для общей криотерапии (WBC) используется более 40 лет без четкого представления о механизме лечебного действия, технологических условиях безопасности пациентов, номинальных затратах энергии в системах криостатирования. Первоначально использование криотерапевтических процедур, предложенных японцем Т. Ямаучи, началось без формирования научной концепции метода, что привело к ряду необоснованных решений. В частности, из-за замены охлаждающих систем на жидком азоте на парокомпрессионное охлаждение с более высокой температурой эффективность метода снизилась на порядок. Рассмотрены достоинства и недостатки азотной и «безазотной» системы охлаждения.
Ключевые слова
Криотерапия, общее криотерапевтическое воздействие, азотная система охлаждения, «безазотная» система охлаждения.

Аппараты для общего криотерапевтического воздействия (WBC) – самый дорогой тип криомедицинского оборудования. Высокая стоимость оригинального оборудования стала непреодолимым барьером для европейских потребителей. Из-за высокой цены японских WBC установок, вопрос об их покупке европейскими клиниками даже не ставился. Вместо этого европейские предприятия попытались самостоятельно изготовить аналогичные устройства. Это решение положило начало многим современным проблемам WBC, которые возникли потому, что европейские разработчики располагали только самой поверхностной информацией об устройстве и принципе действия оригинального оборудования. Как показали выполненные в XXI веке исследования, при проектировании не был учтен алгоритм работы азотной системы охлаждения установок, на которых Т. Ямаучи реализовывал технологию [1]. Изменение базовых принципов работы азотной системы охлаждения (nitrogen cooling system - NCS), не позволило воспроизвести температурный режим оригинальных WBC установок. Из-за этого европейские WBC аппараты внешне походили на оригинал, но не поддерживали оптимальную температуру в основной процедурной кабине. Кроме того цена европейского WBC оборудования осталась достаточно высокой. При работе данных установок с NCS расходовалось много жидкого азота. Затраты денежных средств на его приобретение существенно повышали себестоимость процедур. Стремление снизить эксплуатационные затраты и сделать процедуры более доступными стало причиной того, что в 1990 – 1995 годах в Европе появились криотерапевтические установки, с «безазотными» системами охлаждения (nitrogen-free cooling system (NFCS). Основу NFCS составляют холодильные машины. Независимость от поставок жидкого азота значительно упростила эксплуатацию WBC аппаратов. Существенно снизились эксплуатационные затраты, но в WBC установках с NFCS температура газа в основной кабине не опускается не ниже 170 К. Это значительно выше температура воздуха в оригинальной японской установке (100 К). То, что

температура воздуха в зоне повысилась WBC в 1,7 раза, принципиально изменило характер процедуры на организм пациента. Эффективность процедур WBC снизилась в 10 раз [2].

NCS использовались на первых установках для WBC (рисунок). Эти аппараты были рассчитаны на проведение групповых процедур WBC. В кабине одновременно размещалось от 5 до 10 пациентов. Конструкция многоместных WBC установок идентична конструкции холодильных камер для длительного хранения продуктов питания. Для поддержания криогенного уровня температур в теплообменные аппараты многоместных WBC установок вместо фреона стали подавать жидкий азот. Использование NCS позволило отказаться от энергоемкого оборудования. Энергия необходимая для проведения процедур WBC затрачивается на заводах производящих жидкий азот (LN). Для проведения WBC воздействия на одного пациента надо за 3 мин отвести около 600 кДж теплоты на температурном уровне не выше 140 К [3]. При таких условиях средний поток теплоты от тела пациента составляет 3,4 кВт, а для отвода такого теплового потока на температурном уровне 140 К нужен рефрижератор с мощностью электропривода 13 кВт. Использование LN избавляет владельца WBC установки от необходимости подключать к электросети и эксплуатировать мощные системы охлаждения.

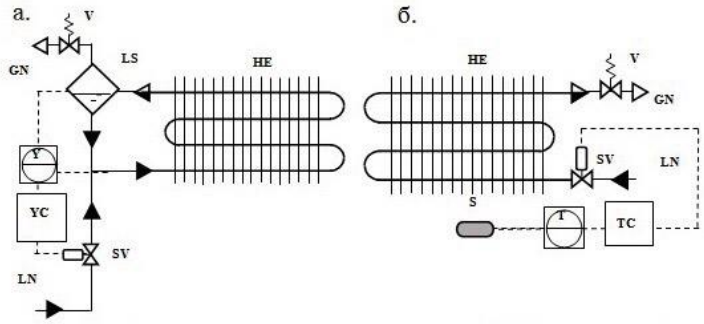


Рисунок. Азотная система охлаждения зоны WBC японских (а) и европейских (б) установок

Последние годы появляются все больше статей утверждающих, что WBC не обеспечивает никаких лечебных эффектов. Эти утверждения связаны с тем, что для исследований используются WBC аппараты с NFCS с номинальной температурой не ниже 160 К. На современном этапе развития WBC техники и технологии NCS являются единственным работоспособным вариантом отвода теплоты из зоны WBC.

Литература

1. Баранов А.Ю., Шестакова О.А., Василёнок А.В. Двадцать лет клинической эксплуатации отечественных аппаратов для общего криотерапевтического воздействия // Холодильная техника. – 2018. – №5. – С. 2-7.
2. Баранов А.Ю. Низкотемпературные установки медицинского назначения. Ч. 1. Аппараты для общего криотерапевтического воздействия: учеб. пособие. – СПб: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2016. – 178 с.
3. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Шестакова Е.А. Теплофизические основы производства эффективной аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2018. – №3. – С. 39–57.

УДК 621.59

КЛАССИЧЕСКИЙ КАСКАДНЫЙ ЦИКЛ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А.Ю. Баранов, Л.Р. Кутьянова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

abaranov@corp.ifmo.ru, lkutyanova4568@gmail.com

Аннотация
Природный газ уже давно занял лидирующую строчку на мировом топливном рынке. XXI век считается веком природного газа благодаря ряду причин. Преимущества ПГ по сравнению с нефтью очевидны: относительно доступный по цене, экологичный и надежный источник энергии, запасов природного газа больше, чем нефтяных, только в России запасы природного газа превышают 50 трлн м^3. Но, с другой стороны, удаленность месторождений от мест потребления ставит вопрос о поставке газа. Решением проблемы стало ожижение природного газа.

Ключевые слова
Сжиженные природный газ, метан, каскадный цикл.

Россия на сегодняшний день имеет достаточный опыт реализации проектов малотоннажного производства. Но такие проекты не способны решить масштабную задачу экспорта СПГ. Россия имеет огромные залежи природного газа, реализация эти запасов хватит и для локально потребления, и для задач экспорта. Рынок СПГ с каждым днем растет. Множество проектов, связанных с производством СПГ, дают прекрасную возможность реализации наиболее энергетически выгодными технологических линий сжижения природного газа с более оптимальной энергоэффективной ступенью предварительного охлаждения [1].

Наибольшее распространение в сфере крупнотоннажного производства сжиженного природного газа получили однопоточный каскадный цикл со смешанным хладагентом и турбодетандерный цикл с рефрижератором и классический каскадный цикл. однопоточный цикл имеет наиболее простую технологическую схему, меньшее число единиц оборудования, но уступает по в термодинамической эффективности процесса остальным двум видам цикла, из-за использования смеси компонентов азота, метана, этана и пропана в виду потерь, вызванных конденсацией более высококипящих компонентов. Альтернативным решением стала комбинация данного цикла с классическим каскадным циклом. С точки зрения эксплуатации и строительства установки наиболее экономически выгоден турбодетандерный цикл, в котором холодопроизводительность обеспечивает двухступенчатое расширение на лопатках турбины.

Рассмотрим классический каскадный цикл, схема которого изображена на рисунке. Стоит учесть, что концентрация метана в ПГ на месторождениях может достигать от 70 до 98%, во-вторых, на каждом месторождении различная концентрация составляющих компонентов, что приводит к отдельным расчетам теплофизических свойств ПГ, поэтому обращаются к схемам сжижения метана, теплофизические свойства ПГ в большей степени определяются свойствами метана [3].

Главный ТО1 является четырехпоточным, он как правило витой, имеющий наибольшую теплопередающую поверхность (площадь поверхности теплообменного оборудования в оптимизированном каскадном цикле может достигать 160 тыс. м2). Все

это осложняет расчеты на этапе проектирования. Чтобы облегчить данную задачу такие теплообменники разделяют на два и более отдельных ТО.

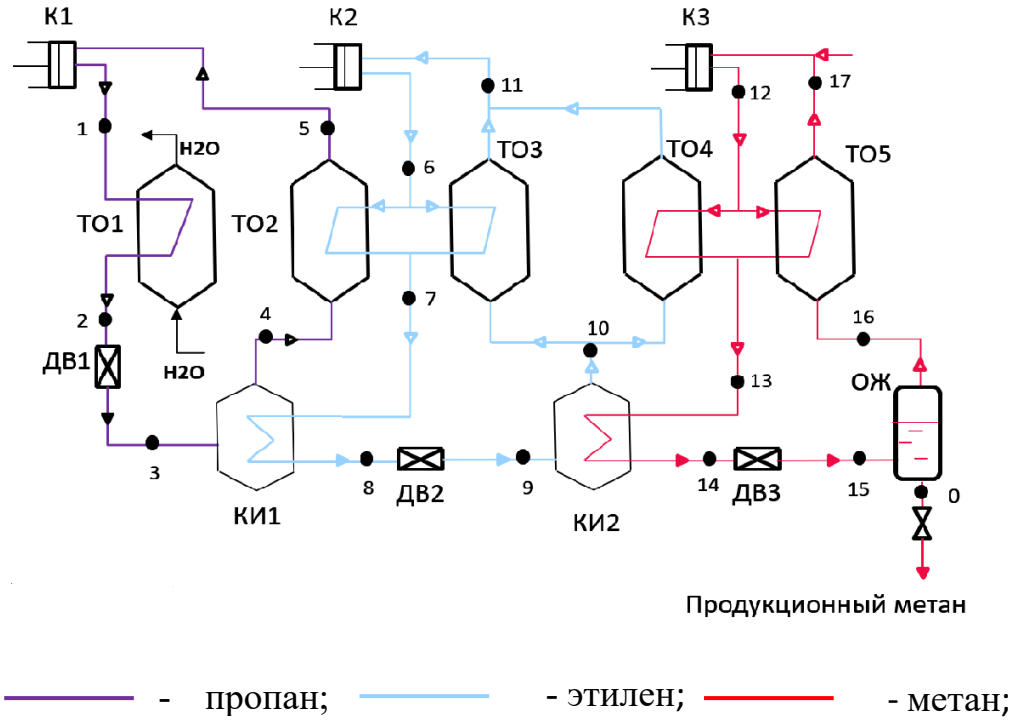


Рисунок. Принципиальная схема установки сжижения метана [2]

На рисунке изображена принципиальная схема установки сжижения метана, где К1, К2, К3 – компрессоры; ТО1, ТО2, ТО3, ТО4, ТО5 – теплообменные аппараты; ОЖ – отделитель жидкости; ДВ1, ДВ2, ДВ3 – дроссельные вентили; КИ1, КИ2 – конденсаторы-испарители; ОЖ – отделитель жидкости; точки 0 – 17 отмечают состояние газа или жидкости после К1, ДВ1 и т. д.[2].

В первом каскаде цикла пропан сжимается в К1 до давления 1МПа, затем охлаждается в ТО1, в котором в качестве хладагента выступает вода. Пропан расширяется в ДВ1, где конденсируется, и поступает в КИ1, там испаряется, и в виде пара поступает в ТО2, охлаждая половину потока этилена, и обратно в компрессор.

Во втором каскаде цикла К2 сжимает этилен до 1,86 МПа, затем этилен разделяется и поступает в два параллельно работающих теплообменных аппарата ТО2 и ТО3. В первом этилен охлаждается парами пропана из КИ1, а во втором теплообменнике этилен охлаждается своими парами из КИ2. В КИ1 этилен конденсируется, расширяется в ДВ2 и поступает в КИ2, где отдает теплоту метановому потоку и охлаждается свой прямой поток в ТО3, затем поступает обратно в компрессор [4].

Метановый цикл сжимается в К3 до 2,45 МПа, далее процесс аналогичен второму каскаду, но после расширения в ДВ3 метан поступает в отделитель жидкости, где жидкая фаза поступает к потребителю, а испарившаяся возвращается в ТО5, где охлаждает свой прямой поток, после ТО5 газообразный поток метана объединяется с недостающей долей потока и возвращается в К3 [5].

Величины циркуляционного потока метана может определяться из совмещенного решения уравнений теплового баланса [6]:
ТО5 и ТО4

$$G(CH_4)\cdot(i_{12} - i_{13}) + q = G(CH_4)^{ц}\cdot(i_{17} - i_{16}) + n\cdot G(C_2H_4), \qquad (1)$$

где *n=50%,* т.к. поток C_2H_4 разделяется поровну на два теплообменника КИ1, ТО2, ТО3 [8]

$$G(C_2H_4) \cdot (i_6 - i_7) + q = n \cdot G(C_2H_4) \cdot (i_{11} - i_{10}) + G(C_3H_8) \cdot (i_5 - i_4). \quad (2)$$

Расход воды из уравнения теплового баланса

$$\frac{G(H2O)}{Cph2o} = G(C_3H_8) \cdot (i_1 - i_2) \quad (3)$$

Удельные затраты энергии на сжижение метана, при изотермическом КПД [6] компрессора $\eta_{из} = 0{,}6$:

$$l_0(C_3H_8) = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\eta_{из} \cdot x}; \quad (4)$$

$$l_0(CH_4) = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\eta_{из} \cdot x}; \quad (5)$$

$$l_0(C_2H_4) = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\eta_{из} \cdot x}; \quad (6)$$

Литература

1. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина 2011. – 159 с.
2. Герш С.Я. Глубокое охлаждение.- Москва, Ленинград, ГосЭнергоИздат, 1957. – 392 с.
3. Баранов А.Ю., Тихонов К.А., Андреев А.М., Березин Н.А. Энергоэффективные циклы сжижения природного газа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 1. С. 1-8.
4. Усюкин И.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. – М., Пищевая промышленность 1976.- 343 с.
5. LNGas.ru [Электронный ресурс] Сжиженный природный газ. URL: http://lngas.ru/lng-equipment/teploobmenniki-plastinchatye-navitye.html.
6. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. Том 1. Основы теории и расчета.– М.: Машиностроение, 1996. - 576 с.

УДК 624.953

ЭФФЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ КРУПНОТОННАЖНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

К.А. Валентинова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Valentinova_96@bk.ru

Аннотация

Резервуар для сжиженного природного газа (СПГ) – это своего рода сосуд для хранения, который сильно отличается от других. Во-первых, размер резервуара СПГ очень велик, и его вместимость составляет до 200 000 м^3. Резервуары для хранения СПГ вполне могут считаться новой разработкой для многих стран. Во-вторых, низкая температура СПГ увеличивает изоляционную часть, что приводит к сложному процессу, требующему большого количества времени на разработку и установку. Эта работа сочетает в себе различные конструктивы резервуаров СПГ, предполагающие детальное изучение с точки зрения внутренней и внешней конструкции, конструкции днища с защитой угла и конструкции верха с защитой угла. Кроме того, рассчитываются утечки тепла для каждой части, чтобы показать, что они являются приемлемыми.

Ключевые слова

СПГ; резервуар; механический дизайн; тепловой дизайн.

На сегодняшний день СПГ за счет энергоемкости единицы объема является одним из самых перспективных источников энергии в виду, помимо первого, своей экологичности, возможности доставки в удаленные от других топливных источников территории и даже континенты.

Уже сегодня создано множество принципов разработки хранилищ с улучшенными функциями и более эффективным конструктивом. Многие резервуары для хранения, построенные на сегодняшний день по всему миру, обладают большим полезным объемом. Например, резервуар на острове Канви, построенный еще в 1960-х годах, имеет вместимость 9 тыс. куб. м. В начале 1980-х годов был построен пиковый резервуар British Gas вместимостью до 50 тыс. куб. м [1]. Затем была разработана конструкция резервуара для хранения СПГ с большей емкостью. Резервуары завода СПГ на о. Сахалин объемом по 100 тыс. куб. м каждый, а на заводе сжижения природного газа в Австралии «Дарвин» и вовсе установлен всего один резервуар объемом 188 тыс. куб. м.

Основываясь на исходных данных, резервуар будет состоять из внутреннего резервуара из 9% никелевой стали, наружного резервуара из предварительно напряженного бетона, подвесного потолочного настила, вспомогательной системы защиты днища и углов и системы обогрева днища. Расчетное давление составляет 29 кПа, а расчетная температура -170°C. По программе HYSYS расчетная скорость выкипания (РСВ), используемая в проекте, составляет 0,025% всего объема в день. Это исследование прояснит полную конструкцию резервуара для хранения СПГ большой емкости путем объединения различных принципов в одной конструкции.

Требования современных стандартов имеют определенные недостатки, ограничивающие совершенствование конструкции. Так, например, как BS-EN 14620, так и API-620, ориентированы на применение металлических фитингов и конструкций,

в то время как уже сегодня надежность конструкции может быть обеспечена применением бетона. Данная работа предлагает рассмотрение действующих мировых нормативов и выщепление наиболее оптимальных аспектов из них для создания наиболее совершенной конструкции.

Конструкция резервуара СПГ имеет строгие требования к материалам из-за низкой температуры и большой вместимости. Выбор материала будет осуществляться в соответствии с законом BS-EN-14620, который рекомендует, чтобы на всех деталях, таких как внутренние лестницы резервуара и кожух или нижняя плита, использовалась сталь с содержанием 9% никеля, где температура во внутреннем резервуаре достигает -180 ° C. В то время как изоляционная часть будет включать пенополиуретан, упругое стекловолокно и перлитбетон для предотвращения утечек тепла. При сварке следует соблюдать требования ASME / AWS SFA-5.11 или SFA-5.14, а также использовать алюминий или нержавеющую сталь 304 для подвески в верхней части.

Внутренняя часть является наиболее важной частью, которая находится в непосредственном контакте с СПГ. Основная часть конструкции внутреннего резервуара включает размеры плиты, допустимое напряжение и высоту наполнения с рабочим объемом до 200 000 м^3. Для изолирующей части проектное условие должно охватывать результаты расчета PCB, кольцевое пространство и свойства изоляции. Основной частью проектного внутреннего резервуара являются статические и динамические расчеты, которые охватывают толщину корпуса, кольцевую пластину, кольцо жесткости и натяжение, напряжение и силу.

Диаметр и высота резервуара зависят от технических характеристик процесса. В таблице приведено краткое описание общих характеристик резервуара СПГ с учетом диаметра и высоты. Поэтому конструкция резервуара для хранения СПГ объемом 200 000 м^3 будет иметь диаметр 85 м, высоту 37 м и 84 метра от внутреннего резервуара.

Таблица

Общие данные для 200 000 м^3 резервуара СПГ

	Параметр	Описание
Общая спецификация	Тип резервуара	надземная, полная локализация
	Материал внутреннего резервуара	9% никелевая сталь
	Материал внешнего резервуара	предварительно напряженный бетон
	Крыша	бетонный купол с подвесным потолком
	Вторичный барьер	Система защиты углов из 9% никелевой стали высотой до 5 м от днища резервуара, затем пенополиуретан (PUF) покрытие
	Тип основания	система подогрева рассола (СПР)
	Вместимость брутто	200,000 м^3
	Сейсмические требования	SSE 0,2 г, OBE 0,1 г
	Проектное давление	29 кПа
	Проектная температура	-170oC
	Проектный объем отпарного газа	0,25 объема %/day
	Максимальный расход	11,000 м^3/ч
	Удельный вес СПГ	0,48
	Вертикальный сейсмический отклик	2/3 горизонтальных значений

По выбору внутренний диаметр внутреннего бака составляет D_i = 84 м = 84000 мм.

И высота внутреннего резервуара может быть оценена примерно в 37,6 м, как показано ниже.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h \tag{1}$$

$$200000 \text{ м}^3 = \frac{3{,}14}{4} 84000^2 \cdot h \tag{2}$$

Расчетный уровень жидкости: 36,22 м и максимальный рабочий уровень: 35,92 м, теперь статическое давление столба жидкости можно рассчитать, как показано ниже:

$$p = \rho g h = 426 \text{ кг/м}^3 \cdot 9{,}81 \text{ м/с}^2 \cdot 37{,}6 \text{ м} = 150 \text{ кПа}$$

Расчетное давление составляет 29 кПа, как уже упоминалось, затем 150 кПа> 5% от 29 кПа, поэтому его следует учитывать, и общее давление будет 29 + 150 = 179 кПа. Толщина корпуса внутреннего резервуара может быть определена по следующему уравнению:

$$\delta = \frac{P_c \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_k \theta - 0{,}179} = \frac{0{,}179 \cdot 84000}{2 \cdot 225 - 0{,}179} = 30 \text{ мм} \tag{3}$$

Тогда толщина внутреннего резервуара составит 32 мм.

Часть изоляции боковой стенки находится между внутренней оболочкой резервуара и наружной концентрированной емкостью. В случае утечки из внутреннего резервуара СПГ может накапливаться в кольцевом пространстве между внутренним и внешним резервуарами и охлаждать стенку / нижний угол. Перлитбетон, пенополиуретан и упругое стекловолокно с 9%-ными никелевыми стальными пластинами будут использоваться для предотвращения потерь тепла.

Уравнение толщины изоляции приведено ниже:

$$D_{out} \ln \frac{D_{out}}{D_{in}} = 2 \frac{\lambda}{a_s} \cdot \frac{T_s - T_f}{T_a - T_s} = 2 \frac{0{,}23}{8{,}141} \cdot \frac{30{,}7 + 273{,}15 - (-162 + 273{,}15)}{35{,}2 - 30{,}7} = 2{,}43 \tag{4}$$

D_{out} = 86,4 м и толщина изоляционного слоя 1,2 м.

В этой конструкции толщиной 1200 мм для изоляции боковых стенок используется 350 мм упругая стекловолоконная часть (30% от общей части изоляции).

Установка кольца жесткости в резервуар для хранения может эффективно противостоять внешней экструзии и улучшить стабильность внутри резервуара, когда резервуар пуст. Обычная процедура для создания колец жесткости заключается в переносе нагрузки давления на расстояние 0,5 от пространства между кольцами на каждой стороне кольца.

$$\textit{Толщина оболочки } (L_s) = \frac{\textit{высота внутреннего бака} - \textit{толщина десяти плит}}{10} \tag{5}$$

$$L_s = \frac{37600 - 181{,}9}{10} = 3742{,}2 \text{ мм}$$

В случае, если число жестких колец известно, EN-14015 предлагает нижеследующее уравнение, чтобы найти Ls.

$$K = \frac{95000}{5800P} = \frac{95000}{5800 \cdot 2{,}5} = 6{,}55 \tag{6}$$

$$L_s = \frac{K \cdot e_{min}{}^{2,5}}{D^{1,5}} = \frac{6{,}55 \cdot 11^{2,5}}{84^{1,5}} \approx 3742{,}2 \text{ мм} \tag{7}$$

Как уже упоминалось, внутренний диаметр резервуара составляет более 40 м. Следовательно, минимальный размер кольца жесткости должен составлять более 200 мм, как указано Коулсоном (1983). В этом случае для всех ребер жесткости выбирается 382 мм.

Теперь важно проверить, будут ли опорные кольца действовать как эффективные кольца жесткости. Расчетное давление связано с давлением скорости ветра и степенью вакуума, которая находится между внутренним резервуаром и изолирующей частью.

Расчетное давление = степень вакуума + давление скорости ветра = 25 + 0= 25 кПа

Коулсон (1983) показывает, что критическое давление связано с модулем Юнга:

$$P_c = K_c \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_0}\right)^3 = 210 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{32}{84000}\right)^3 = 23{,}22 \text{ кПа} < 29 \text{ кПа} \tag{8}$$

Следовательно, критическое давление ниже расчетного давления, что означает, что кольца жесткости эффективны.

Традиционно резервуары для хранения СПГ изготавливаются из значительного количества 9%-ной никелевой или углеродистой стали [2]. Тем не менее, в этой конструкции будет использоваться бетон для снижения стоимости материала и времени строительства.

Чтобы предотвратить растрескивание СПГ в нижней части бетонной стены, следует предусмотреть герметичную систему защиты, термически изолированную с помощью ячеистой стеклянной изоляции и экранированная 9%-ными никелевыми стальными пластинами. Проектирование будет выполняться с использованием анализа методом конечных элементов с учетом нагрузок давления и термических напряжений или движений.

Внешний бак должен содержать все содержимое внутреннего бака. Незначительные и крупные случаи утечки должны быть проверены с помощью анализа методом конечных элементов и совмещены с максимальным давлением в анализах, что уже сделано при проектировании внутреннего и внешнего резервуара.

Как уже упоминалось, температура внутри внутреннего бака составляет -162°C [3], что может привести к замерзанию фундамента и стены. Встроенный нагревательный трубопровод должен быть установлен в бетонной плите основания, чтобы предотвратить воздействие холодной жидкости на фундамент.

Резервуар для хранения СПГ является тяжелым оборудованием, поэтому конструкция бетонной фундаментной плиты считается важной секцией для предотвращения опускания и разрушения резервуара. Под бетонной фундаментной плитой находится более 596 труб, которые разделены в круглой области диаметром 1,2 м и длиной 25 м на трубу.

В конструкции резервуара для СПГ емкостью 200 000 м^3 тщательно продумано увеличение подъема купола до 0,8 от стенки наружного диаметра стенки [4]. За

исключением конструктивной безопасности, до сих пор не существует специальных ограничений, связанных с законами, налагаемыми на форму бетонного купола, однако в качестве дополнения следует использовать законы для слоя из углеродистой стали, который крепится внутри бетонного купола. В API 650 указано, что радиус кривизны вкладыша должен составлять от 0,8 до 1,2 d.

Следующие нагрузки должны учитываться при проектировании больших резервуаров низкого давления [5]: внутреннее давление, указанное в API-620, и любой частичный вакуум в результате работы; вес резервуара и указанное содержимое, от пустого до полного, с указанным максимальным давлением газа или без него; наложенная нагрузка, например, платформы и кронштейны для лестниц и, где этого требуют климатические условия, чрезмерный снег; ветровые нагрузки, если указано, нагрузки от землетрясений и нагрузки от подключенных трубопроводов.

Также при проектировании крупнотоннажных резервуаров необходимо ограничить утечки тепла. Для этого необходимо для начала рассчитать общее ограничение утечки тепла, затем утечки из изоляционной части, из нижней части и из трубопроводов, после чего выполнить проверку на допустимость.

В данной работе представлен обзор на существующие стандарты в области разработки крупнотоннажных резервуаров СПГ и комбинирование наиболее эффективных разработок для модернизации конструктива резервуара.

Литература

1. Аммар Али Абд, Самах Заки Наджи, Фархан Лафта Рашид «Efficient Design of a Large Storage Tank for Liquefied Natural Gas»// Журнал Вавилонского университета техни-ческих наук, вып. (26), № (6) – 2018.
2. NFPA 58. Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases.
3. NFPA 59. Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases at Utility Gas Plants.
4. API 2510. Design and Construction of LPG Installations. American Petroleum Instltute (API), Eighth Edition, May 1995. – 34 p.
5. API 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks.

УДК 621.59

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОСЕТИ

А.В. Глушаев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Lorencia48155@gmail.com

Аннотация
В данной публикации рассмотрены различные проблемы при внедрении сверхпроводников в существующие электрические сети. Произведен анализ энергоэффективности и экономической целесообразности внедрения систем на основе высокотемпературных сверхпроводников.
Ключевые слова
Сверхпроводимость, ВТСП, криогенные системы.

Технологии высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) активно развиваются во всем мире [1]. На сегодняшний день несколько применений этой технологии приближаются к коммерциализации. Конечно, это заняло четверть столетия, чтобы добраться до этой точки, так как открытие ВТСП состоялось в 1986 году. И все еще есть существенные проблемы, которые должны быть преодолены, чтобы действительно распространить электрические энергосистемы с технологией ВТСП:

1. Стоимость: это самая очевидная проблема, так как обычные (медные) силовые кабели стоят в несколько раз дешевле чем ВТСП, особенно если принять во внимание дорогое сопутствующие оборудование. Конкретные цифры зависят от специфики проекта и многих других факторов. Конечно этот пункт игнорирует ключевые функциональные преимущества силового ВТСП оборудования, которые могут оправдать более высокую цену - хотя бы до определенной степени. Охлаждение является еще одним важным компонентом затрат, хотя традиционные энергосистемы также требуют охлаждения, затраты на охлаждение ВТСП имеют более высокие значения.

2. Теплопритоки: для оценки нагрузки на систему криогенного обеспечения необходимо изучить тепловые потери в ВТСП кабеле. Их изучение является важной частью для понимания процессов, происходящих внутри кабеля.

3. Система охлаждения. На сегодняшний день для ВТСП технологии существует проблема отсутствия на рынке уже готовых установок по охлаждению с достаточным уровнем межсервисного интервала и достаточной холодопроизводительностью. Изготовление систем осуществляет под заказ по определенным параметрам. Для разработки таких систем необходимо знать тепловую нагрузку на систему и оптимальную температуру криостатирования. Точный расчет этих параметров позволит сократить потери и тем самым повысить энергоэффективность и снизить стоимость всей системы.

3. Надежность и стандартизация. Еще одна серьезная проблема для ВТСП технологии связана с тем, что внедрение технологии все еще находится в зачаточном состоянии. Скорость с которой технология прогрессирует, как изготовление новых

сверхпроводящих материалов, так и в конструкции и демонстрации силового оборудования, создает проблему для надежности в работе коммунального хозяйства.

4. Новизна: сопутствующая проблема – это естественная осторожность коммунальной отрасли при введении любых новых технологии в электросеть. Обычная технология работает и имеет высокую надежность и большой опыт использования. Тем не менее, многие годы успешных демонстраций ВТСП технологий постепенно знакомят специалистов с возможностями и преимущества силового ВТСП оборудования. Новые требования к электросети, также заставляют их принимать новые технологии для решения проблем, которые сложно решить обычными средствами.

Для сравнения возьмем ситуацию, где необходимо заменить трёхфазную кабельную линию в городской сети на более мощную. Необходимая мощность кабельной линии из трёх кабелей составит 750 МВт. Длина линии составит 2.5 километра. Уровень напряжения и сила тока для медного кабеля составит 330кВ и 0.75кА соответственно. Для ВТСП кабеля эти значения составят 110кВ и 2.5кА. На рис. 1 показан уровень потерь энергии при передаче в ВТСП и традиционных кабелях при разной нагрузке 100% и 70%. Для оценки потерь в ВТСП кабелях принимались значения теплопритоков [2]: 2 Вт/м от теплового излучения, 1.5 Вт/м от потерь переменного тока, 350 Вт на один токоввод. Эффективность системы криогенного обеспечения – 10%. Затраты на охлаждение учитываются как потери энергии всей линии. Как показано на рис. 1 потери мощности при передачи через ВСТП кабели составляют две трети от традиционных кабелей при 100% нагрузке. И примерно равны при загрузки системы на 70%.

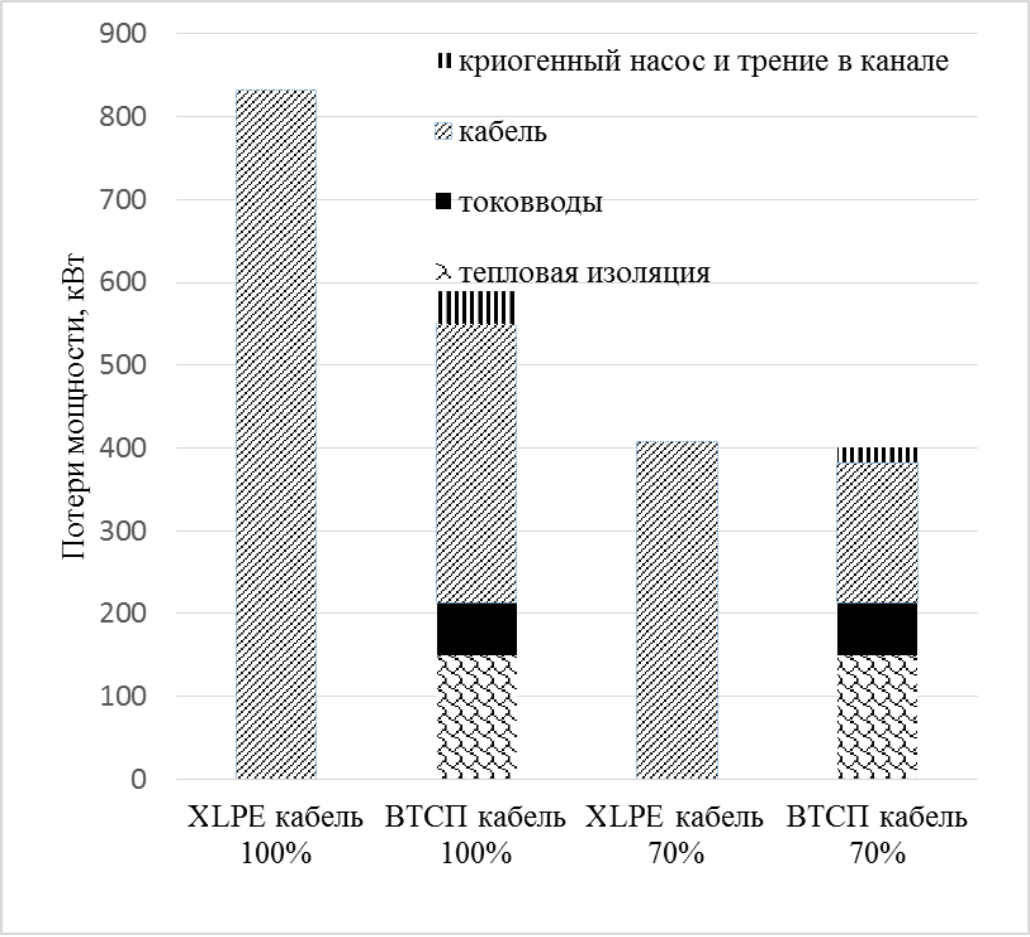


Рис. 1. Потери мощности в линиях электропередач длиной 2,5 км

Детали затрат на строительство такой кабельной линии представлены в таблице [3 – 4]. Так как пропускная способность традиционного кабеля ниже чем у ВТСП, то необходимо построить новый тоннель для традиционной кабельной линии, а для ВТСП линии будет использоваться уже существующий кабель-канал.

Таблица

Затраты на строительство кабельных линий.

Параметр	XLPE КЛ	ВТСП КЛ		ВТСП КЛ (прогноз)
XLPE кабель	25 тыс. руб/м	–		–
ВТСП кабель	–	56 тыс.руб./кАм (одна фаза)		28 тыс.руб./кАм (одна фаза)
Система криогенного обеспечения (СКО)	–	10 млн.руб/кВт		5 млн.руб/кВт
Работы по сборке и наладке узлов	25 тыс.руб/м	25 тыс.руб/м		25 тыс.руб/м
Строительно-монтажные работы (тоннель)	1,3 млн.руб./м	25 тыс.руб/м		25 тыс.руб/м

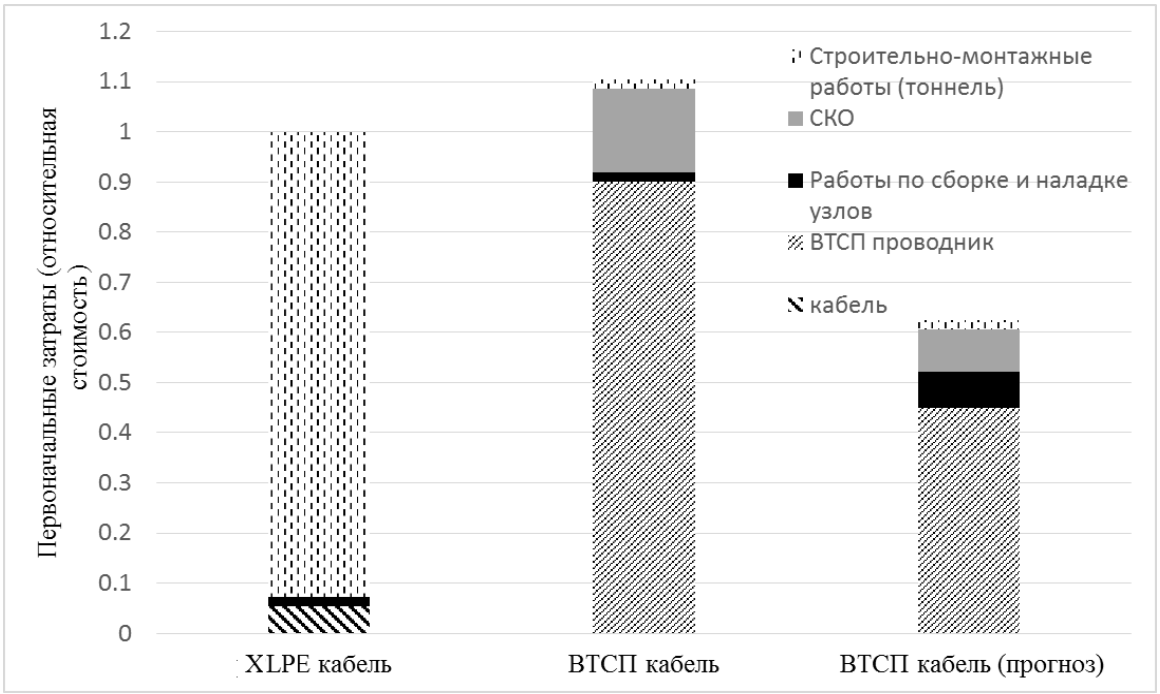


Рис. 2. Сравнительная оценка стоимости традиционной и ВТСП кабельной линии

На рис. 2 показан результат расчета относительной стоимости прокладки кабельных линий. Как показано на рисунке, стоимость ВТСП кабельной линии сегодня в плотной городской среде сопоставима с традиционным кабелем. В будущем стоимость ВСТП проводника и систем охлаждения будет снижаться за счет более массового внедрения ВТСП технологий в электросеть. Что сделает проекты более рентабельными и выгодными в различных направлениях энергетики. Например в

Санкт-Петербурге продолжается строительство ВТСП линии между подстанциями ПС 330 кВ «Центральная» и ПС 220 кВ РП-9 мощностью 50 МВт.

Литература

1. Фетисов С.С., Сверхпроводящие кабели для электроэнергетики – состояние работ в мире и в России // Кабели и провода. – 2014. – №3 (346). – С. 22-29.
2. Бударгина О.М., Малышенко С.П. Кн. 2. Инновационные водородные и сверхпроводниковые технологии для энергетики. – М.: Наука, 2012. –162 с.
3. ПАО «ФСК ЕЭС», Сборник «Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35-750 кВ». Часть 1. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2000. –33 с.
4. Сытников В.Е., Рябин Т.В., Сорокин Д.В. Применение ВТСП кабельных линий постоянного тока в электроэнергетике // Энергия единой сети. – 2015. – № 3 (20). – С. 28-39.

УДК. 621.6.057

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТУРБИНЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИВОДА ПОГРУЖНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ОТГРУЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ КРУПНОТОННАЖНЫХ ХРАНИЛИЩ

М.И. Давыденко, А.Ю. Баранов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

mishelloooh@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время совершенствование системы производства сжиженного природного газа (СПГ) занимает лидирующие позиции в стратегии развития промышленности Российской Федерации. Основными производственные задачи, поставленные перед работниками отрасли, заключаются в разработке отечественных технологий для производства, хранения и транспортировки СПГ.

Одну из ключевых ролей в системе поставки СПГ играют электроприводные погружные криогенные насосы, осуществляющие отгрузку сжиженного газа из резервуаров хранения в танки судов-газовозов. Однако, использование электрических насосов вызывает ряд эксплуатационных осложнений: насосы характеризуются низкой надежностью и ремонтопригодностью, что в значительной степени связано с низкой надежностью уплотнений вращающихся элементов (подшипников электродвигателя и сальников вала насоса и т.п.). Очевидна потребность в модернизации конструкции криогенного насоса в целях повышения их надежности и эффективности работы.

В статье рассмотрен вариант модернизации криогенных погружных насосов СПГ за счет использования в качестве привода насоса гидротурбины. Представлена математическая модель работы гидротурбины на сжиженном газе. Сделаны заключения о возможности согласования рабочего колеса гидротурбины с рабочим колесом центробежного насоса.

Ключевые слова

Сжиженный природный газ, криогенные насосы, крупнотоннажные хранилища, выдача сжиженного газа, криогенный насос, крупнотоннажные заводы СПГ, привод насоса, гидропривод, гидротурбина.

Гидравлическая турбина – двигатель, преобразующий механическую энергию жидкости в энергию вращения турбины. Известно несколько основных видов турбин. Активные турбины используют кинетическую энергию потока жидкости, при этом рабочие элементы машины находятся при атмосферном давлении. В реактивных турбинах используются обе энергии: кинетическая и потенциальная энергия потока жидкости, при этом давление на входе и выходе рабочего колеса одинаковое. В реактивных турбинах рабочее колеса погружено в рабочую жидкость [1].

Исходя из специфики работы погружного криогенного насоса, в качестве привода могут рассматриваться только реактивные турбины. Необходимость погружения турбины вместе с насосом в резервуар объясняется требованиями к снижению теплопритоков к криогенной жидкости из окружающей среды. Реактивные гидротурбины по своей конструкции делятся на осевые, диагонально поворотно-лопастные и радиально-осевые [1].

На территории Российской Федерации наиболее распространены заводы крупнотоннажного производства сжиженного природного газа. На таких заводах СПГ хранится в резервуарах-хранилищах объемом порядка 40 000 м^3. Высота такого хранилища составляет от 50 м. Таким образом, привод насоса должен развивать достаточную мощность для обеспечения напор потока жидкости не менее 50 м.

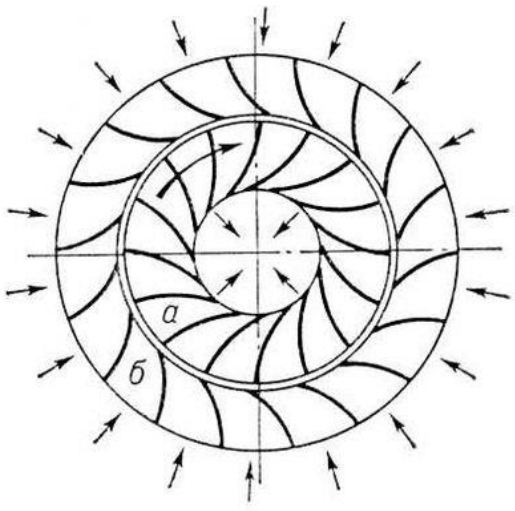
На сегодняшний день уже существуют гидравлические турбины, работающие на криогенных жидкостях. Такие машины имеют типично расположенные в осевом направлении составные части, работающие при температуре ниже температуры окружающей среды. Криогенные турбины используют радиальный впуск текучей среды, что снижает вероятность вскипания жидкости и повышает надежность работы турбины [2].

Таким образом, исходя из приведенных выше требований к работе привода на криогенной жидкости, в частности СПГ, гидротурбина для работы в качестве погружного насоса СПГ должна обеспечивать напор не менее 50 м, радиальную подачу потока к рабочему колесу и высокую надежность работы. В таб. 1 представлены основные характеристики реактивных турбин. На рис. 1 представлена схема реактивной турбины.

Таблица 1

Характеристики реактивных гидротурбин [3]

Вид реактивной турбины	Характеристики		
	Напор, м	Надежность	Направление жидкости
Осевая	до 80	низкая	Не меняется
Диагонально поворотно-лопастная	50-170	средняя	Поток жидкости проходит по конической поверхности (по диагонали)
Радиально-осевая	40-600	высокая	Поток жидкости изменяет направление с радиального на осевое



а – рабочее колесо; б – направляющий аппарат [3]
Рис. 1. Схема реактивной турбины

Исходя из представленных характеристик, а также требований к приводу погружного криогенного насоса СПГ, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным вариантом является использование радиально-осевой гидротурбины в качестве привода центробежного погружного насоса СПГ.

На сегодняшний день разработаны радиально-осевые турбины, способные использовать в качестве рабочей жидкости сжиженный природный газ. На рис. 2 представлена схема гидротурбины, работающей на криогенной жидкости. Турбина содержит рабочее колесо (6) турбины, смонтированное на вращающемся валу (8), по меньшей мере один радиальный впуск (12) для криогенной жидкости вращающей (жидкости не сжимаются, а значит и расширяются) турбину, и сухое газовое уплотняющее средство (30) в месте вдоль вращающегося вала (8) между рабочим колесом (6) турбины и подшипниками (20 и 22). Также имеется термический барьерный элемент между рабочим колесом (6) турбины и сухим газовым уплотняющим средством, газовая камера (76) на стороне сухого газового уплотняющего средства термического барьерного элемента и впуск (78) для криогенного газа в указанную газовую камеру (76) [2].

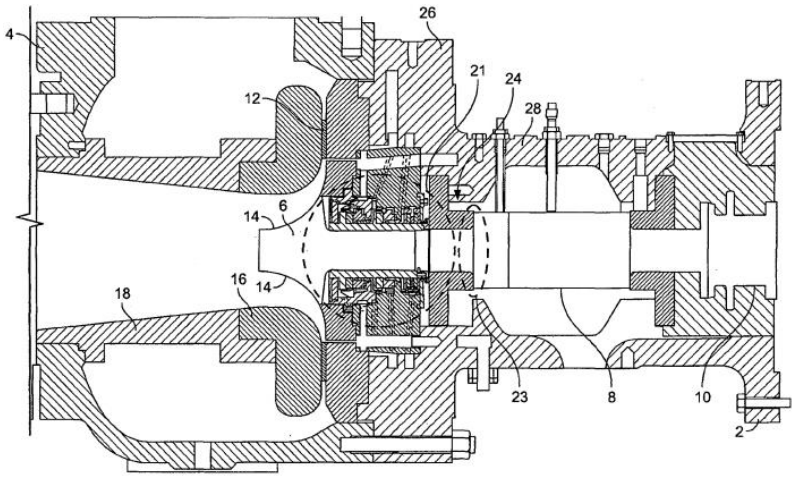


Рис. 2. Гидротурбина на криогенной жидкости [2]

В качестве рабочей криогенной жидкости для представленной турбины может быть использован природный газ, а также жидкий азот или жидкий воздух. Рабочий диапазон температур от минус 100°С до минус 170°С. Такой диапазон температур постоянно поддерживается в газовой камере. При испарении жидкости не менее 90% криогенного газа выходит из газовой камеры на рабочее колесо турбины.

Для обоснования полученного вывода необходимо подтвердить согласованность работы рабочего колеса гидротурбины с рабочим колесом центробежного насоса СПГ. К основным параметрам работы турбины относятся: мощность турбины, обеспечиваемый напор, расход рабочей жидкости через турбину. На основании общепринятых формул теории гидравлических машин была получена математическая модель работы гидротурбины.

Расчетная высота гидростатического столба метана:

$$H_H = \frac{p_н}{\rho \cdot g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность сжиженного природного газа, принимается равной $450\ кг/м^3$; $p_н$ – давление потока жидкости, МПа.

В таком случае, потенциальная энергия единицы массы жидкости, поднятой на величину некоторую высоту:

$$E_{\text{п}} = g \cdot H, \tag{2}$$

где Н – высота подъема единицы массы жидкости, м.

Затраты энергии на подъем жидкости в насосе/турбине:

$$E_{\text{н}} = \frac{E_{\text{п}}}{\eta_T}, \tag{3}$$

где η_T – КПД насоса/турбины.

Отношение расхода в насосе к расходу в турбине:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{н}}}. \tag{4}$$

Расход жидкости через турбину:

$$Q_{\text{тур}} = Q_{\text{нас}} \cdot \varepsilon, \tag{5}$$

где $Q_{\text{нас}}$ – расход жидкости через насос, кг/с.

Доля отвода жидкости на турбину:

$$\delta = \frac{Q_{\text{нас}}}{Q_{\text{тур}}}. \tag{6}$$

Мощность турбины определяется по формуле:

$$P_T = 9{,}81 H \cdot Q \cdot \eta_T, \tag{1}$$

где H, Q – напор и расход рабочей жидкости (криогенной) через рабочее колесо гидротурбины; η_T – КПД гидротурбины.

Напор определяется следующим выражением [4]:

$$H = H_H + \Delta H - h_{пот}, \tag{2}$$

где H_H – номинальный напор; $h_{пот}$ – потери напора в подающем сечении.

$$\Delta H = -\frac{L}{gS} \cdot \frac{dQ}{dt} \tag{3}$$

$$h_{пот} = A \cdot K_1 \cdot L \cdot Q^2, \tag{4}$$

где L – длина и площадь сечения подающего трубопровода; A – удельное сопротивление материала подающего трубопровода; K_1 – поправочный коэффициент к значениям A для труб [5].

Диаметр рабочего колеса гидротурбины:

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_T}{9{,}81 \cdot \eta \cdot H_p \cdot Q_1' \cdot \sqrt{H_p}}}, \tag{5}$$

где H_p – расчетный напор гидротурбины; $Q_I^{'}$ – приведенный расход рабочей жидкости в расчетной точке; η – КПД натурной турбины, соответствующий режиму ее работы в расчетной точке.

$$Q_I^{'} = (1,3 \div 1,5) \cdot Q_{опт}^{'}. \quad (6)$$

Применительно к сжиженному природному газу целесообразно заменить расход в метрах на давление соответствующего столба жидкости. Таким образом, необходимо для всех представленных выше выражений заменить позицию напора (Н) следующим выражением:

Исходя из условий работы криогенного погружного насоса принимаем давление жидкости на входе в гидротурбину $p_н = 7 МПа$. Расход жидкости через турбину $Q_{опт}^{'} = 2000\ м^3 / час$. Длина подающего трубопровода L = 0,5 м. Диаметр трубопровода d = 0,01 м. Материал трубопровода – сталь с высоким содержанием никеля. С помощью средств MS Excel был проведен расчет основных параметров работы гидротурбины на сжиженном природном газе. Результаты расчета представлены в таб. 2.

Таблица 2

Результаты расчета

Плотность метана жидкого, кг/м^3	450
Давление потока жидкости, МПа	7
Расчетная высота гидростатического столба метана, $H_Н$, м	1585,68
Потенциальная энергия единицы массы поднятой на $H_Н$, Дж/кг	15555,56
Высота подъема СПГ, м	50
Энергия подъема единицы массы на такую высоту , Дж/кг	490,5
КПД насоса,	0,7
Затраты энергии в насосе , Дж/кг	700,71
КПД турбины	0,75
Затраты энергии в насосе на единицу поданного СПГ, Дж/кг	934,29
Отношение расхода в насосе к расходу в турбине, кг/кг	22,2
Расход через насосы, кг/с	200
Расход через турбины, кг/с	9,01
Доля отвода жидкости на турбины	0,045
Потери напора в подающем сечении, м	150,6
Потери напора на трение, м	-648,9
Мощность турбины, кВт	3070,5
Диаметр рабочего колеса гидротурбины, мм	165

Полученные значение физических величин являются вполне оптимальными, следовательно, представленные выше формулы могут быть использованы для расчета гидротурбин в различных режимах работы насосов отгрузки СПГ из крупнотоннажных хранилищ.

Таким образом, в данной работе был проведен подбор наиболее оптимального типа гидравлической турбины для использования в качестве привода компрессора. В качестве гидротурбины был принят радиально-осевой тип гидравлических турбин. Был проведен расчет и анализ полученных значений основных параметров работы гидротурбины. Дальнейшим этапом работы является расчет рабочего колеса центробежного насоса на основании полученных характеристик гидротурбины.

Литература

1. Барлит В.В., Гидравлические турбины: учеб. пособие / Киев: Вища школа, 1977. – 360 с.
2. [Электронный ресурс URL: https://findpatent.ru/patent/259/2592691.html – дата обращения 06.06.2019 г.]
3. Брызгалов В.И., Гордон Л.А. Гидроэлектростанции: учеб. пособие / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – 541 с.
4. Смирнов И.Н. Гидравлические турбины и насосы / М.: Учебное пособие.Высшая школа, 1969. – 400 с.
5. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах / М. – Л.: Госэнергоиздат, 2006. – 256 с.

УДК 621.6

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

Т.М. Жекписов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

zhekpisovtimur@gmail.com

Аннотация
В данной статье описываются различные виды теплообменных аппаратов, которые применяются в криогенной технике. Представлены их принципиальные схемы. Так же, приводится описание проблем, которые возникают во время эксплуатации тех или иных видов теплообменников.
Ключевые слова
Теплообменный аппарат, криогенная техника, трубчатый теплообменник, витой теплообменник, пластинчато-ребристый теплообменник.

Теплообменный аппарат является одним из важнейших компонентов многих криогенных систем, таких как ожижители и криокулеры. Существует множество различных конфигураций криогенных теплообменников, которые обычно можно классифицировать как трубчатые теплообменники, пластинчато-ребристые теплообменники и витые теплообменники. Характеристики каждого из этих типов будут рассмотрены в этой статье.

1) Трубчатые теплообменники

Простейшим трубчатым теплообменником является теплообменник с концентрическими трубами или двухтрубные теплообменники (рис. 1). Теплообменник состоит из небольшой внутренней трубки, в которой обычно течет поток высокого давления, соосный с большей трубой, причем поток низкого давления течет в кольцевом пространстве между двумя трубами. Блок обычно наматывается в спираль, чтобы сохранить пространство, и катушка часто помещается в вакуумированную емкость, чтобы уменьшить теплопередачу от окружающей среды.

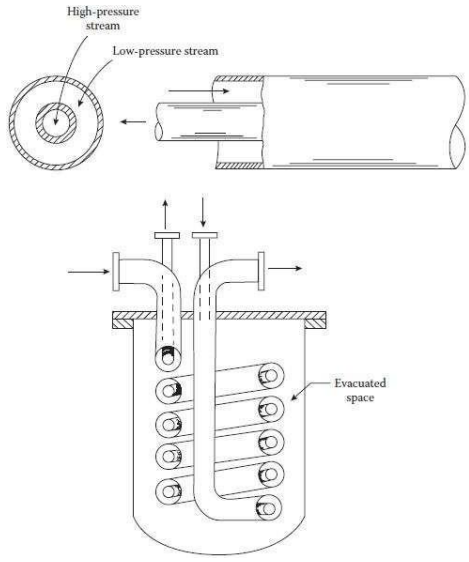


Рис. 1. Теплообменник с концентрическими трубами

Проволочная или пластиковая прокладка может быть спирально намотана снаружи внутренней трубы теплообменника (рис. 2). Использование проставки позволяет закрепить внутреннюю трубу внутри наружной трубы, а также заставляет жидкость в кольцевом пространстве следовать по более длинной спиральной траектории. Эта конфигурация приводит к увеличению скорости жидкости и увеличению коэффициента теплопередачи по сравнению с основным расположением концентрических труб. Использование спиральной прокладки также приводит к увеличению потерь давления жидкости.

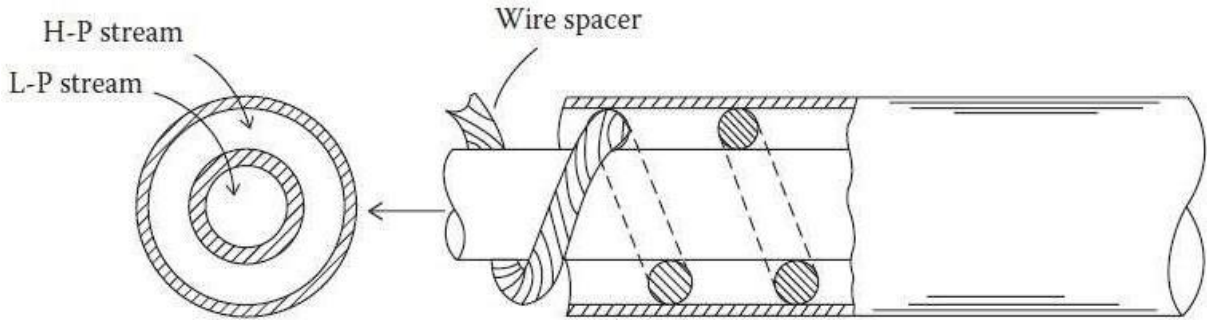


Рис. 2. Теплообменник с концентрическими трубами и с проволочной намоткой

В некоторых криогенных системах существует потребность в обмене теплом между тремя или более потоками. Одним из простых теплообменников для этого применения является многотрубный теплообменник (рис. 3). Поток высокого давления течет в одной из маленьких трубок, поток промежуточного давления течет в двух других малых трубах, а поток низкого давления течет в пространстве между небольшими трубками и большой трубкой. Такие элементы, как проставки, спиральные обмотки и радиальные ребра, используются для поддержки небольших трубок внутри большой трубки.

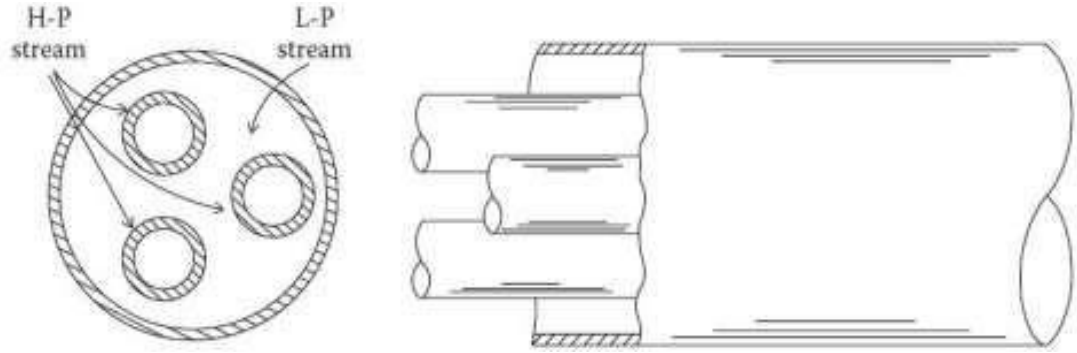


Рис. 3. Многотрубный теплообменник

2) Витой теплообменник

Классическим теплообменником, используемым в крупномасштабных системах сжижения воздуха и СПГ, является витой теплообменник (рис. 4). Теплообменник состоит из аккуратно расположенных трубок малого диаметра, намотанных спиралью в несколько слоев вокруг цилиндра или сердечника. Оправка обеспечивает механическую устойчивость и поддержку при изготовлении и эксплуатации теплообменника. Минимальный диаметр цилиндра сердечника определяется диаметром, при котором сплющивание труб меньшего размера будет происходить при намотке на оправку. Последовательные слои трубок намотаны в противоположных направлениях и разделены промежутками. Трубки прикреплены к коллекторам на

обоих концах теплообменника, чтобы позволить потоку входить или выходить из теплообменника в одной трубе. Плотно прилегающая наружная оболочка размещается вокруг внешней стороны катушки, а весь блок теплоизолирован.

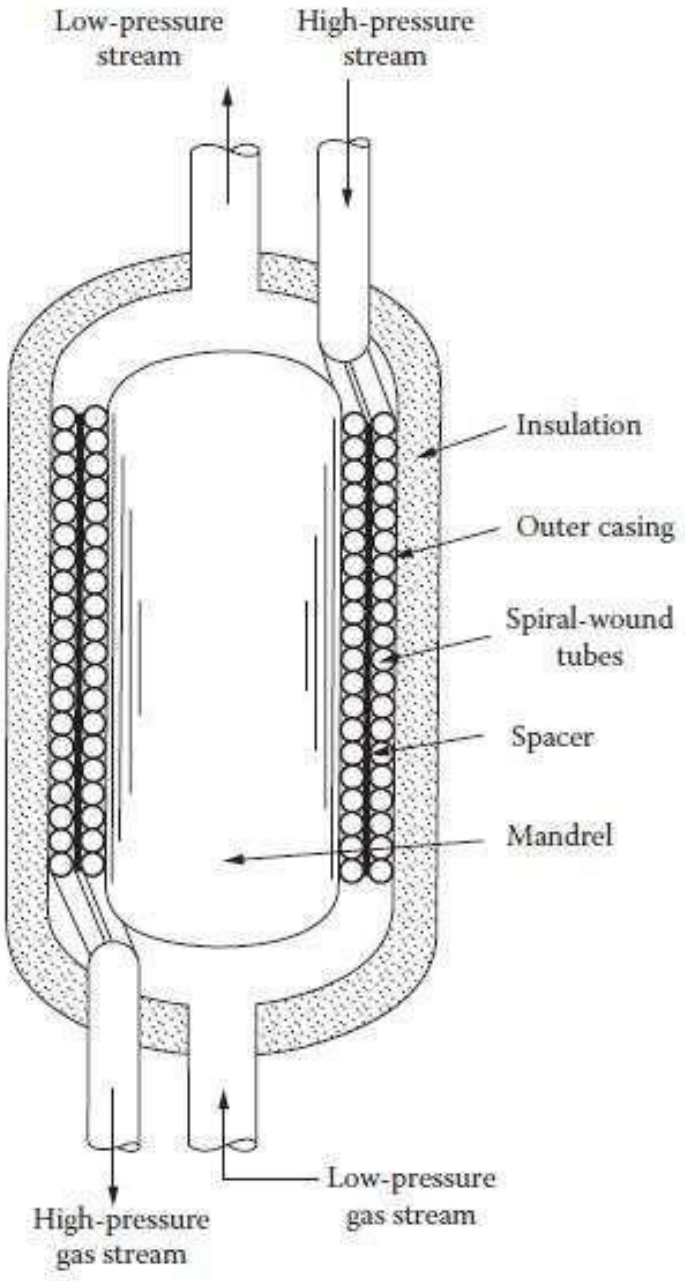


Рис. 4. Витой теплообменник

Поток высокого давления протекает внутри небольших трубок в теплообменнике, а поток низкого давления протекает поперечным потоком в кольцевом пространстве между оправкой и внешним кожухом. Несколько слоев труб могут быть использованы для обеспечения множества параллельных каналов для потока высокого давления, тем самым уменьшая перепад давления при трении. Теплообменник может быть рассчитан на три или более потоков, в которых, например, потоки высокого и среднего давления протекают внутри небольших трубок. Чтобы поддерживать равномерное распределение движения флюидов для потоков, протекающих внутри небольших трубок, длина каждого прохода для потока обычно

одинакова от слоя к слою. Это достигается путем изменения шага спирали каждого последующего слоя.

3) Пластинчато-ребристые теплообменники

Пластинчато-ребристые теплообменники состоят из чередующихся слоев гофрированных штампованных металлических листов (ребер), разделенных плоскими металлическими разделительными листами (пластинами) (рис. 5). Поток вводится в проходы оребрения и собирается из них через коллекторы, приваренные или припаянные на конце каждого слоя. Несколько типов оребрения было использовано, включая прямые ребра, волнистые, зубчатые и т.д. Для создания конфигураций потока, таких как противоточные, поперечные и многопроходные теплообменники, могут использоваться различные компоновки. Конфигурация противотока чаще всего используется в криогенных системах из-за лучших тепловых характеристик противоточного теплообменника для данной площади поверхности теплопередачи [1].

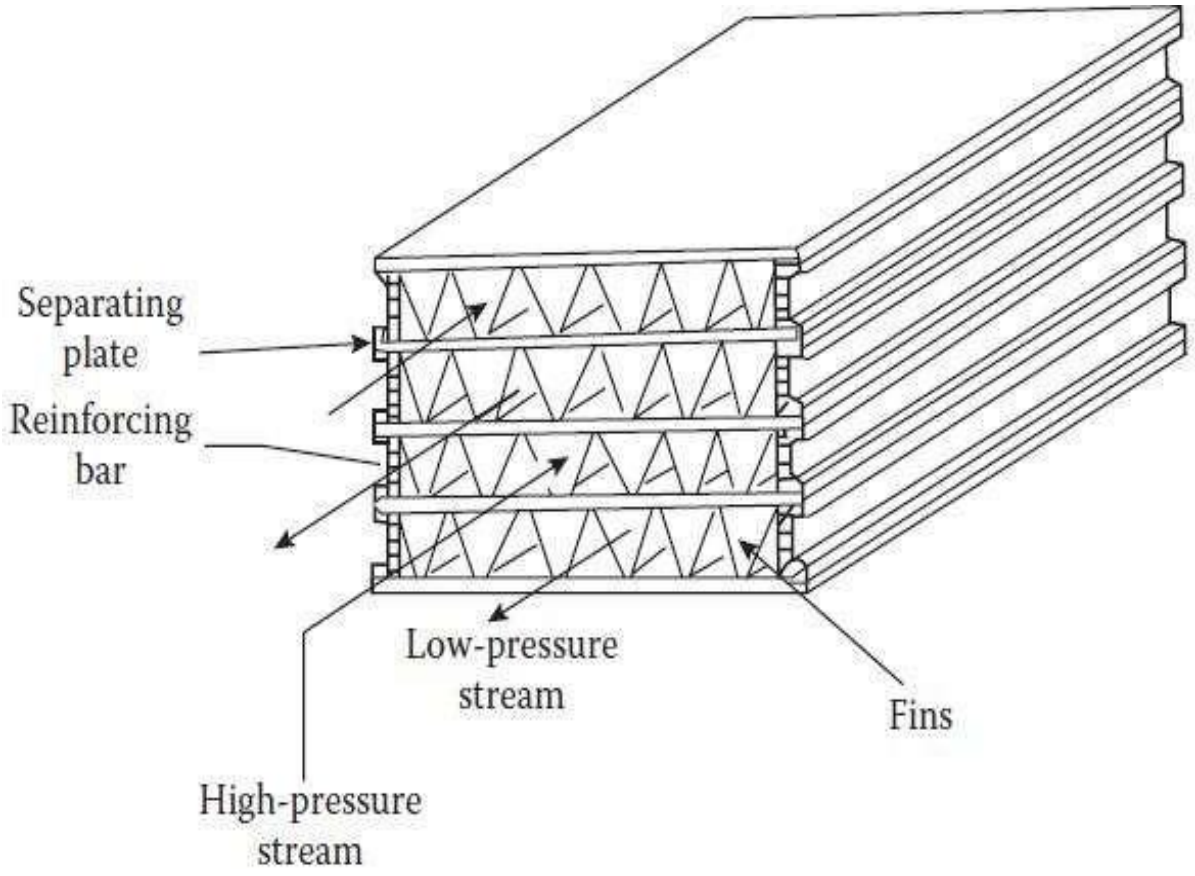


Рис. 5. Пластинчато-ребристые теплообменник

4) Кожухотрубный теплообменник со скрученными трубками

Теплообменник со скрученными трубками возник в Восточной Европе и стал коммерчески доступным в Скандинавии в середине 1980-х годов. Он был разработан в первую очередь для преодоления ограничений, присущих обычной технологии оболочек и труб.

Теплообменник со скрученными трубками состоит из пучка труб уникальной формы, собранных в пучок без использования перегородок (рис. 6).

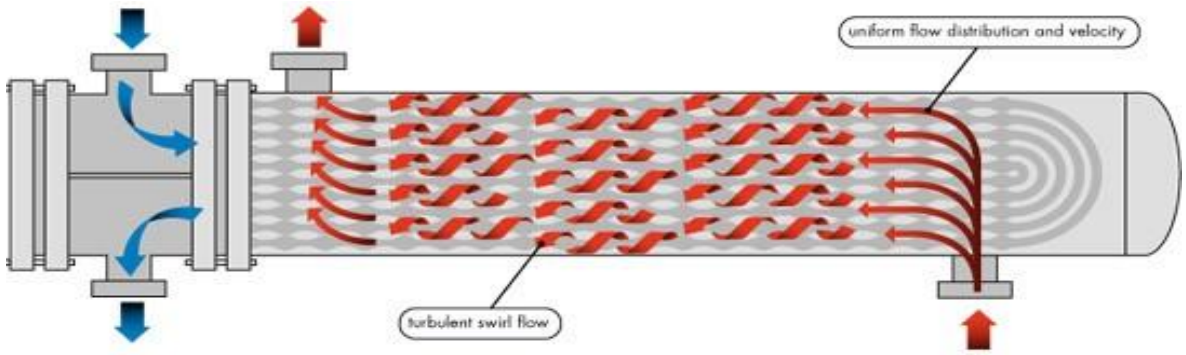


Рис. 6. Кожухотрубный теплообменник со скрученными трубками

Трубки были подвергнуты уникальному процессу формования. Они имеют овальное поперечное сечение и вытянуты в спираль. Это обеспечивает спиралевидный путь потока. Процесс формования гарантирует, что толщина стенки трубы остается постоянной, а предел текучести материала не превышается, сохраняя тем самым механическую целостность. Концы трубы имеют круглую форму, что позволяет соединять обычные трубы с листами.

Трубки собраны в пучок с треугольным шагом по одному ряду. Каждая трубка поворачивается для выравнивания скручиваний в каждой плоскости по длине трубного пучка. Такое выравнивание приводит к тому, что трубки контактируют друг с другом во многих точках по длине в пучке. Готовый пучок затем плотно обвязывают по окружности, чтобы обеспечить отсутствие движения трубки, и в результате получается прочный пучок. [2, 3].

Литература

1. Randall F. Barron, “Cryogenic System”, Second edition, Oxford university Press, 1985.
2. Butterworth D., Guy, A.R., and Welkey J.J., Design and Application of Twisted Tube Heat Exchangers.
3. Small W.M. and Young R. K. 1979 Heat Transfer Engineering, Vol. 1.

УДК 629.556

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ГРУЗА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОЕКТА РЕЧНОГО ТАНКЕРА КЛАССА РЕКА-МОРЕ

Л.В. Иванов, А.Ю. Баранов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

levladiv@mail.ru

Аннотация
Рассматриваются варианты модификации речного танкера класса река-море для возможности транспорта в нем дизельного топлива и СПГ. Подбирается оптимальная система хранения груза и определяется будущая вместимость танкера после модернизации.
Ключевые слова
Речной танкер, Ленанефть, северный завоз, СПГ, речной транспорт, независимые танки, танки типа С.

В настоящее время все большее значение приобретает оптимизация транспортировки энергоносителей. В России эта проблема стоит особенно остро и имеет свои уникальные особенности. Во многом они обусловлены территориальным размахом. В данной работе речь пойдет про специфичный исключительно для России метод доставки – доставка топлива в северные районы речным транспортом, так называемый «северный завоз». Топливо, в особенности дизельное, доставляется по крупным сибирским рекам в северные регионы посредством речных нефтеналивных танкеров.

В России активно развивается производство сжиженного природного газа, особенно в северных районах. СПГ, производимый на заводе «Ямал-СПГ» необходимо транспортировать в центральную Россию для покрытия внутреннего спроса на газ.

Идея совместить доставку дизеля на север и СПГ на юг по крупным сибирским рекам представляет собой осуществимый и перспективный проект. В качестве основы для транспортного средства нового типа, предлагается использовать уже существующие проекты и типы речных танкеров, в том числе и тех, которые предполагаются к обновлению и выведению из эксплуатации, такие как «Ленанефть-Р77» и «Ленанефть-Тип 627». Суть идеи заключается в том, чтобы транспортировать СПГ и дизельное топливо на одном и том же судне: на север – дизель и на юг – СПГ. Подобная схема транспортировки значительно позволит снизить транспортные издержки, увеличит потребление и развитие внутреннего рынка СПГ.

Для решения технической задачи по транспортировке одним речным танкером и дизельного топлива, и СПГ необходимо определить какую систему хранения груза следует использовать. Поскольку СПГ является более «требовательным» с техническом точки зрения, следовательно следует отталкиваться от существующих систем для транспортировки СПГ.

Суть идеи транспортировки дизеля и СПГ в одном танке заключается в том, что после транспорта дизеля на север, танк, в котором он перевозился захолаживает, тонкая пленка, оставшаяся после отгрузки дизеля, на стенках и дне танка кристаллизуется и плотно пристает к внутренним стенкам танка. После этого в захоложенный танк поступает СПГ и не смешивается с дизелем внутри него. Аналогичным образом после

того, как доставленный на юг СПГ отгружается из танка, замороженная дизельная пленка оттаивает и судно может быть готово к загрузке в него дизельного топлива. Для реализации подобной проекта необходимо определить тип и размер танков для будущей модернизации.

Существует целое семейство различных систем для транспортировки СПГ морскими видами транспорта. СПГ транспортируется в специальных емкостях, называемых танками. Существует два основных типа корабельных танков для СПГ: самонесущение и несамонесущение, которые также называют мембранными. Встроенные танки объединены с корпусом судна и испытывают внешние нагрузки, а также участвуют в обеспечении и поддержании прочности корпуса. Мембранные танки не являются самонесущими и состоят из тонкой мембраны, уложенной на изоляцию. Изоляция, в свою очередь, располагается прямо на корпусе судна, так что давление в танке напрямую передается конструкциям корпуса. Корпус судна является основным несущим элементом таких танков [1].

Для определения наиболее подходящей системы необходимо рассмотреть существующие и выявить их плюсы и минусы, применительно к описанной проблеме.

Самонесущие танки не являются частью корпуса судна. Они сооружаются отдельно от корпуса танкера и при строительстве судна просто вкладываются внутрь. Все независимые самонесущие танкеры подразделяются на три типа [2]:

- Тип A;
- Тип B;
- Тип C.

Вторым большим семейством являются не самоподдерживающие танки. Их также называют мембранными. Хотя в малотоннажной перевозке СПГ они и используются – в рассматриваемом проекте их применение малоосуществимо. Несмотря на низкий BOR, максимальный коэффициент использования трюмного пространства и широкий опыт эксплуатации все упирается в то, что эти танки являются неотъемлемым корпусом судна, в котором они установлены [3]. Это не позволяет их эксплуатировать в рамках проекта модернизации уже существующих используемых танкеров. Ниже представлено сравнение параметров подобных систем (таб. 1).

Таблица 1

Сравнение параметров систем

Параметр:	Тип A	Тип B Moss	Тип B SPB	Тип C цилиндр	Тип C двудольные
Вес системы	высокий	низкий	средний	высокий	высокий
Параметры безопасности	Более низкие, чем у типа B и C	да	да	да	да
Общий опыт эксплуатации	нет	да	только в плавучих регазификационных терминалах	да	да
Опыт эксплуатации в малотоннажном транспорте	нет	да	да, только в качестве топливных танков	да	да
Наличие вторичного барьера	да	частичный	частичный	нет	нет

Продолжение таблицы

Параметр:	Тип А	Тип В Moss	Тип В SPB	Тип С цилиндр	Тип С двудольные
Вес системы	высокий	низкий	средний	высокий	высокий
Простота адаптации под существующие суда	да	нет	нет	Да, высокая	Да, высокая
Рациональное использование трюмного пространства	да	нет	да	нет	да
BOR	0,25	0,15	0,15	0	0
Простота эксплуатации	нет	Нет, но лучше, чем тип А	да	да	да
Возможность частичного заполнения	нет	да	да	да	да
Влияние на навигационные свойства	нет	да	нет	нет	нет

Из представленной выше таб. 1 очевидно, что лучше всего подходят танки цилиндрические танки типа С. Примерный объем танков рационально определять из конструкционных параметров корпусов уже существующих судов. Сравнивать следуют их показатели длины, ширины и осадки с уже существующим модернизируемым судном класса «Ленанефть».

Существует несколько конструкций корпусов судов класса «Ленанефть». Наиболее используемый это «Тип 627». Судно нуждаются в модернизации, так как не отвечают современным требованиям, предъявляемым к нефтеналивным судам дедвейтом менее 5000 тонн, так как оно не имеют второго дна и вторых. У этого танкера следующие параметры корпуса:

- Длина – 122,75 м
- Ширина – 15,3 м
- Высота борта – 5,2 м
- Высота габаритная – 13,2 м
- Дедвейт – 3652 т
- Осадка в грузу – 2,53 м

Необходимо найти сходные по размерам суда, чтобы приблизительно оценить будущий объем транспортируемого СПГ. Далее приведены параметры существующих малотоннажных судов с танками типа С (таб. 2) [4, 5].

Таблица 2

Параметры существующих малотоннажных судов с танками типа С

Название корабля	Тип танка	Объем транспортируемого СПГ, м^3	Длина судна, м	Ширина судна, м	Осадка судна, м	Дедвейт, т
Kayoh Maru (каботажный танкер)	1 шт – цилиндр.	1517	71,51	13,5	4,4	1401

Продолжение таблицы

Название корабля	Тип танка	Объем транспортируемого СПГ, м^3	Длина судна, м	Ширина судна, м	Осадка судна, м	Дедвейт, т
Sninju Maru (каботажный танкер)	1 шт – цилиндр.	2540	86,25	15,1	3,8	1781
Kakurei Maru (каботажный танкер)	1 шт – цилиндр.	2536	86,29	15,1 м	4,7	1801
Akebono Maru (каботажный танкер)	2 шт – цилиндр.	3556	99,37	17,2	4,6	2528
Coralius (бункеровщик)	2 шт. – двудольн.	5800	99,6	17,84	5,7	3077
Cardissa (бункеровщик)	2 шт – цилиндр.	6500	119,94	19,4	6,3	5320
ENGIE Zeebrugge (бункеровщик)	2 шт – цилинд.	5000	107,6	18,4	4,6	3121
Lucia Ambition (каботажный танкер)	3 шт – цилиндр.	18928	130	25,7	6,1	1101

Кажется, что у судна «Coralius» – значительно отличающиеся параметры по дедвейту и перевозимому грузу, но все это объясняется тем, что топливная система этого корабля использует в качестве топлива только отпарной газ из основных танков. Это позволяет значительно снизить общий дедвейт судна [6].

По существующим данным можно установить зависимость между дедвейтом судна и объемом транспортируемого СПГ. Таким образом методами интерполяции можно определить ориентировочный суммарный объем танков СПГ для танкера «Тип 627». На рисунке представлен график зависимости дедвейта от суммарного объема танков СПГ.

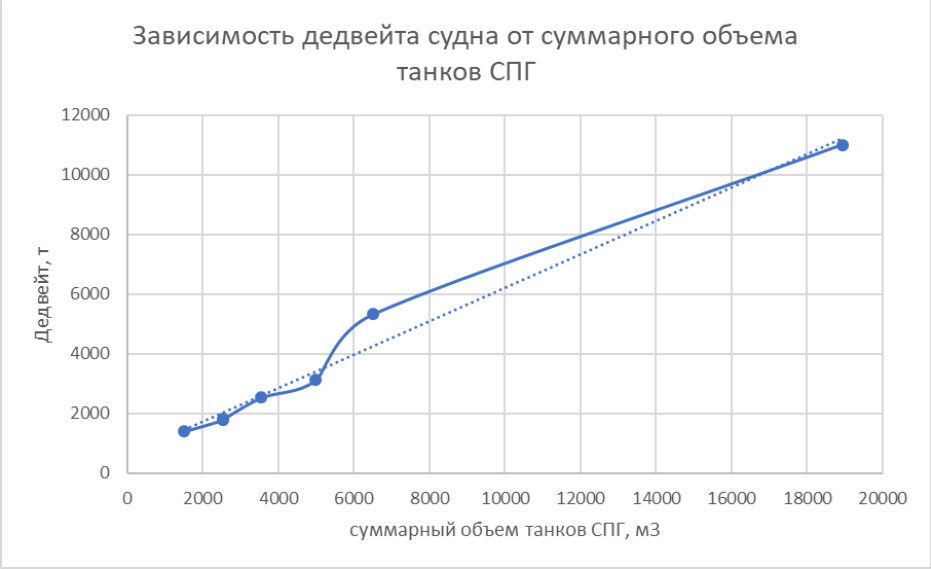


Рисунок. График зависимости дедвейта от объема танков

Литература

1. Баскаков С.П. Перевозка сжиженных газов морем. Учеб. пособие. – СПб.: Судостроение, 2001 – 272 с., ил.
2. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (кодекс IGC) – СПб.: «ЗАО ЦНИИМФ», 1999 – 292 с.
3. Иванов Л.В. Анохин А.В. Анализ мембранных систем хранения груза для танкеров-газовозов – СПб.: Морской Вестник, 2019 – 12 с.
4. Fleet List Small Scale LNG Carriers – Updated URL: https://small-lng.com/fleet-list-small-scale-lng-carriers-updated/ (дата обращения 09.06.2019).
5. TGE Marine Gas Engineering Company Presentation, 2018 – 29 с.
6. Coralius: 5800 m^3 LNG Bunker and feeder vessel URL: https://www.fkab.com/wp-content/uploads/sites/3/Coralius-LNG.pdf (дата обращения 09.06.2019).
7. Leonidas Karistios - Small-scale LNG ships: a report into the commercial drivers and technical requirements for seaborn small-scale supply – Southampton, UK: Lloyd’s Register Marine, 2018 – 32 с.

УДК 62-8

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОВОГО ПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ ПРОЕКТА "БАЛТИЙСКИЙ СПГ"

А.А. Ивашин, А.А. Рыжкова, Е.В. Соколова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

sanya-ivashin@mail.ru, 13ryzhkova05@mail.ru, evlogvinenko@corp.ifmo.ru

Аннотация

Современное мировое производство сжиженного природного газа (СПГ) развивается стремительными темпами. Из всего газа, поставляемого производителями на экспорт, тридцать процентов (290 млн т) приходится на СПГ. Технология сжижения, с применением которой удается уменьшать объем природного газа в 600 раз, делает СПГ удобным для транспортировки на большие расстояния без необходимости строительства магистральных трубопроводов.

При внедрении СПГ в экономику Российской Федерации одним из основных направлений является строительство крупных заводов – производителей СПГ, размещенных в районах добычи газа. В большинстве случаев такой газ идет на экспорт специальными криогенными танкерными судами и железнодорожным транспортом. В связи с этим основательное изучение и проработка проблем, связанных с особенностями сжижения газа, строительством крупнотоннажных заводов СПГ даст возможность России выйти на новый уровень экономического развития [1, 2, 3].

Ключевые слова

Сжиженный природный газ, крупнотоннажные заводы СПГ, привод компрессора, паровая турбина, энергоэффективность.

С масштабным увеличением экспортных объемов могли бы справиться крупные российские заводы СПГ, но главная сложность развития таких проектов в условиях санкций связана с отсутствием отработанных отечественных технологий сжижения природного газа. На данный момент в России действует только один крупный завод по сжижению газа в рамках проекта «Сахалин-2» – в 2015 году он произвел около 11 млн т СПГ. Второй, мощностью до 16 млн т, – «Ямал СПГ» (принадлежит НОВАТЭКу).

Мощное турбокомпрессорное оборудование и большие теплообменники, которые лежат в основе любого крупнотоннажного (5 млн т в год и более) СПГ-производства, никогда не изготавливались в России [4]. Без участия зарубежных производителей разработать и внедрить их в короткие сроки не представляется возможным.

В малотоннажном производстве реализуется криогенное оборудование, спроектированное и произведенное российскими машиностроительными заводами. Такое оборудование пользуется спросом у зарубежных покупателей. По данным российского производителя криогенного оборудования компании «Криогенмаш», из более чем 260 малых и средних заводов по сжижению газа, функционирующих в Китае, 90 работают на российском оборудовании.

Стратегически увеличить присутствие России на мировом рынке СПГ малотоннажное производство не может в связи с ограниченностью рынка потребления сжиженного газа в небольших объемах. На внутреннем рынке СПГ сложно конкурировать с трубопроводным топливом: значительный объем газа отечественному

потребителю поставляется, в основном, по трубопроводам, разветвленная сеть которых расположена преимущественно в европейской части страны [5].

Неотъемлемой частью технологического процесса ожижения на установках любой производительности являются компрессоры.

В мировой индустрии СПГ используются, как правило, паровые, газовые и электрические приводы компрессоров. Применение того или иного типа привода на разных заводах СПГ обусловлено рядом экономических, технологических и географических факторов.

В качестве объекта исследования был выбран проект «Балтийский СПГ».

«Балтийский СПГ» – будущий завод в районе морского порта Усть-Луга Ленинградской области. В качестве целевых рынков сбыта СПГ рассматриваются страны Атлантического региона, Ближнего Востока, Южной Азии. Производственная мощность завода оценивается в 10 млн тонн с возможностью расширения до 15 млн тонн в год. Оператор проекта – компания «Ямал СПГ», ее акционерами являются «Новатэк» (с долей 50,1 %), Total (20 %), CNPC (20 %) и китайский Фонд шелкового пути (9,9 %).

Компрессорное оборудование поставляется на Сахалин-2 зарубежными компаниями, такими как Siemens (EC), SEWON (Korea), поставщиками на Ямал СПГ являются COOEC (China), т.к. на этих заводах в качестве привода используется газовая турбина, которых в России на сегодняшний момент не производят.

Российские компании, проивзодящие компрессорное оборудование – АО «РЭП Холдинг», «Уральский компрессорный завод», «Челябинский компрессорный завод» – производители в СПб, турбины – АО «РЭП Холдинг», ОДК, Siemens, «Русские турбины».

Основные преимущества и недостатки компрессорных приводов приведены в таблице [5, 6, 7].

Таблица

Преимущества и недостатки приводов компрессоров

Тип привода	Преимущества	Недостатки
Паровые турбины	1. Хорошо зарекомендовали себя в производстве СПГ; 2. Выбор турбины зависит от требуемой мощности; 3. Регулируемая скорость вращения; 4. Простота эксплуатации и пуска	1. Требуют создания на заводе крупной инфраструктуры (вода, пар и системы конденсации); 2. Увеличивают общую стоимость завода
Промышленные газовые турбины	1. Большой опыт эксплуатации на заводах СПГ; 2. Занимают меньшую площадь; 3. Рентабельность	1. Одновальные турбины требуют стартеров большой мощности.
Авиационные газовые турбины	1. Упрощают схему завода; 2. Рентабельность; 3. Эффективность использования топлива выше, чем у промышленных газовых турбин;	1. Нет опыта эксплуатации в производстве СПГ; 2. Необходимо более высокое давление топливного газа, чем у промышленных турбин

Продолжение таблицы

Тип привода	Преимущества	Недостатки
	4. Быстро удаляются или заменяются	
Электрогазодвигатели	1. Более низкие капитальные затраты; 2. Пониженные эксплуатационные расходы; 3. Большая гибкость в увязке с компрессорами	1. Зависимость от внешнего источника энергии; 2. Проблемы с мощностью, требуемой для запуска двигателя

В данном случае применение электропривода является нецелесообразным, т.к. для обеспечения Балтийского СПГ энергией необходимо строить дополнительную ЛЭП.

Исходя из технических предпосылок, наиболее выгодно использовать в качестве привода паровую или газовую турбины. Это позволит без затруднений применить наиболее экономичный способ регулирования давления и производительности изменением скорости вращения.

Однако, в сложившийся экономической ситуации нужно иметь в виду отсутствие производства газовых турбин в России. Альтернативным источником энергии, в данном случае, может выступать паровая турбина.

Литература

1. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня и завтра / Под ред. А.М. Архарова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2009. – 256 с.
2. Коркунов С.В. Реальные перспективы российских крупнотоннажных СПГ-проектов, Арматуростроение № 6 (105), 2016.
3. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. – 159 с.
4. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.
5. Ходорков И.Л. Сжиженный природный газ в России. – М.: НПКФ «ЭКИП», 2007. – 135 с.
6. Хисамеев И.Г., В.А. Максимов, Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров. – Казань: Изд-во ФЭН, 2010. – 671 с.
7. Хрусталев Б.С. и др. Машины низкотемпературной техники. Методы определения показателей эффективности работы объемных компрессоров: учеб. пособие СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 150 с.

УДК 621.6

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ХРАНИЛИЩ СПГ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

В.Р. Лобанов., В.Н. Замарашкина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация
В статье приведен обзор технологии строительства хранилищ сжиженного природного газа (СПГ) из предварительно напряженного железобетона, приведены примеры успешного применения данной технологии зарубежными коллегами.

Ключевые слова
Сжиженный природный газ, предварительно напряженный железобетон, температура, давление, хранилище СПГ

Сжиженный природный газ (СПГ) – природный газ, который был охлажден до температуры -162^{0}С, при которой он переходит в свою жидкую фазу. Технология эта не нова: впервые её использовали в США более 60 лет назад.

Основное преимущество газа в жидкой фазе – он занимает примерно в 6000 раз меньший объем по сравнению с тем же количеством вещества в газовой фазе. Это дает очевидные преимущества при транспортировке СПГ от крупных газовых месторождений. Кроме того, СПГ нетоксичен, неагрессивен и не имеет ни цвета, ни запаха.

СПГ хранится при атмосферном давлении в резервуарах с двойными стенками: пространство между стенками при этом заполнено изоляцией. Наружные стенки резервуара чаще всего изготавливаются из предварительно напряженного железобетона.

За последние несколько десятилетий мировое потребление СПГ выросло более чем в пять раз; при этом в ближайшее время также прогнозируется рост. Растущий спрос со стороны крупных рынков, таких как Китай и Индия, в сочетании с большим количеством более мелких каналов сбыта, привел к необходимости строительства большого количества объектов для хранения и регазификации СПГ по всему миру.

Размеры резервуара для хранения СПГ обычно составляют 80-90 м в диаметре и 50 м в высоту с толщиной стенок порядка 750 мм (схематичное изображение типичного резервуара для хранения СПГ приведено на рис. 1).

Тросы натяжения в такой конструкции очень крупные, и могут располагаться как горизонтально, так и вертикально. Вертикальные тросы могут быть единичными, проходящими от вершины резервуара до углубления в его основании; так и U-образными, проходящими вертикально от вершины, изгибающимися у основания и возвращающимися обратно к вершине резервуара.

Горизонтальные тросы натяжения начинаются с подпорки и натягиваются до аналогичной на противоположной стороне резервуара. Следующий трос натягивается уже от этой подпорки до изначальной, образуя тем самым своеобразный «обруч» вокруг резервуара. Для более эффективного использования смежные тросы натяжения закреплены на альтернативные подпорки, расположенные перпендикулярно выше отмеченным.

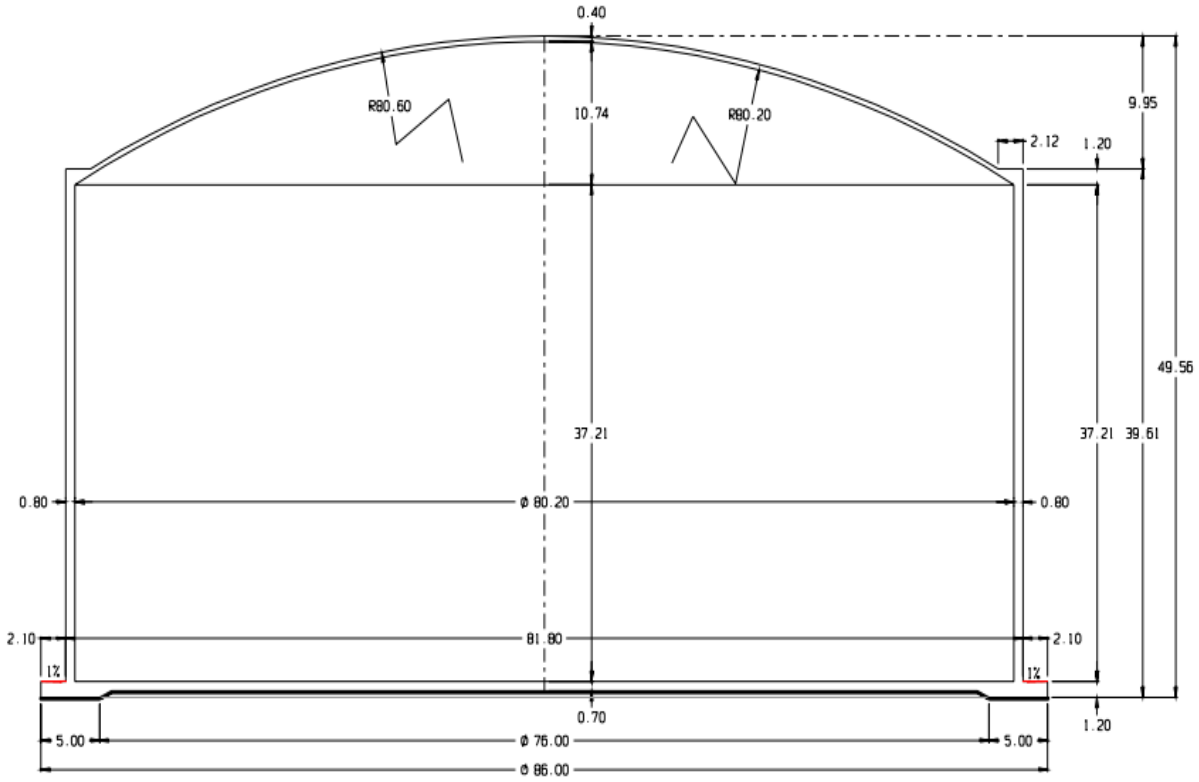


Рис. 1. Схема устройства резервуара для хранения СПГ

Особенности каждого конкретного резервуара и требования к предварительно напряженному железобетону при этом определяет генеральный подрядчик на этапе его проектирования. Специалисты изучают профиль напряжений и детализируют размеры, толщину и расположение тросов натяжения [2].

К сожалению, в настоящее время не существует официального стандарта, определяющего особенности конструирования таких резервуаров. Обычно перед началом работ проводятся следующие испытания [3]:

- Предварительно напряженной стали при стандартной и криогенной температурах;
- Подпорок тросов натяжения в сборке при стандартной и криогенной температурах;
- Распределение нагрузки при криогенной температуре.

Такие испытания проводились, в частности, при строительстве резервуара в городе Перт, Австралия в 2005 году.

Рассмотрим в качестве показательного примера строительство хранилища СПГ в городе Дарвин, Австралия. Завод по переработке и регазификации получает СПГ по подводному трубопроводу с месторождения Баю-Ундан в Тиморском море, расположенном примерно в 500 км от самого завода. Затем жидкость закачивается в резервуар при температуре -162^{0}С и хранится там вплоть до загрузки на танкер для поставки потребителям в Японию.

Этот резервуар имеет наружные бетонные стены толщиной 550 мм. Внутренняя стенка резервуара изготовлена из специального сплава никеля и стали, разработанного специально для экстремально низких температур. Объем резервуара составляет 188 000 м^3 – один из самых крупных наземных резервуаров на момент постройки. Внешний вид резервуара приведен на рис. 2.

Рис. 2. Внешний вид резервуара в городе Дарвин, Австралия

После построения самой конструкции подрядчиком были натянуты приблизительно 570 тонн тросов натяжения. Система представляет собой комбинацию из 172 вертикальных тросов толщиной 15,2 мм и 114 горизонтальных тросов толщиной 15,7 мм.

Вертикальные тросы натянуты примерно до 4000 кН с максимальным натяжением порядка 5000 кН; а горизонтальные – до 5000 кН с максимальным значением в 6000 кН [1].

Горизонтальные тросы закреплены на четырех равноудаленных опорах (которые по сути являются локальным утолщением стенок резервуара). Длина каждого троса составляет примерно 150 м и каждый из них охватывает ровно половину окружности резервуара. Вертикальные тросы закреплены на вершине резервуара и у его основания.

Таким образом, при проектировании и строительстве резервуаров СПГ успешно применима технология с использованием предварительно напряженного железобетона. Однако каждое отдельно взятое сооружение уникально и требует использования качественных и проверенных материалов в сочетании с опытными и квалифицированными подрядчиками.

Литература

1. Design and construction aspects of post-tensioned LNG storage tanks in Europe and Australasia. Электронный источник // wermac.org URL: http://wermac.org/pdf/tanks6.pdf (дата обращения: 12.06.2019).
2. Ву Л.К., Аксенов В.Н. К расчету цилиндрического железобетонного резервуара для хранения сжиженного природного газа // Инженерный вестник Дона. 2015.
3. Хануков Х.М, Алипов А.В., Четвертухин Н.В., Коломыцев А.В., Шигапов Р.Р. Конструкционные методы снижения риска при эксплуатации изотермических резервуаров для хранения СПГ // Вести газовой науки. 2017.

УДК 621.593

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ХРАНИЛИЩ МЕМБРАННОГО ТИПА

В.М. Малашихина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vmalashikhina@bk.ru

Аннотация

В нынешних рыночных условиях рост спроса на новые установки СПГ или на увеличенные емкости хранения, а также рост стоимости сырья делают выбор систем хранения мембранного типа все более привлекательным для хранения СПГ на суше.

Существенное преимущество состоит в исключительной упрощенной модульной структуре, требующей лишь нескольких различных элементов такого же типа, как те, которые используются для СПГ Mark III.

Но хранилищу СПГ придется адаптироваться к новым рыночным условиям. Чтобы удовлетворить большие потребности, стратегическое хранение становится необходимостью, особенно в странах с очень высокой плотностью населения, где регулярно возникает явная нехватка энергии.

Кроме того, колебания цен на СПГ и рассеяние различных источников газа приводят к необходимости дополнительных мощностей для хранения. Как следствие, будет построено больше резервуаров с большей емкостью [1].

Хранилище может быть установлено на берегу или на море, и решение о выборе площадки определяется экономическими, политическими, экологическими, стратегическими задачами. Независимо от выбора, одна и та же технология подходит как для решений на суше, так и на море. Действительно, система удержания мембранного типа СПГ применима к любому виду судна, а также к наземному хранению.

Ключевые слова

Мембранное хранилище, тепловой барьер, гидростатические испытания, герметичность.

Вторичный тепловой барьер

Композитная конструкция из алюминиевого листа, вставленного между двумя слоями тканого стекловолокна. Жесткий вторичный барьер встроен в изоляционные панели на этапе предварительной сборки на заводе. Герметичность между соседними панелями обеспечивается приклеиванием к стыкам полос из этого гибкого материала (FSB: гибкий вторичный барьер).

В случае погрешности первичного барьера, вторичная мембрана обеспечивает герметичность хранилища и защищает бетонный каркас высотой около 50 м от переохлаждения. Защита позволяет безопасно отключать хранилище и, при необходимости, выводить его из эксплуатации. Комплекс из вторичной мембраны и связанной с ней изоляцией называется «Системой тепловой защиты» (TPS) [2].

Вторичная мембрана закреплена на стене бетонной верхней и периферийной вставками.

Влагозащитный барьер

Образован полимерным компонентом, изготовленный из эпоксидной смолы и стеклоткани. Он наносится на внутреннюю поверхность бетонного каркаса, чтобы предотвратить контакт криогенной жидкости или пара с бетоном. Влагозащитный

барьер перекрывает волосяные возможные трещины в бетоне. Толщина барьера около 3 мм.

Вторичный барьер используют как дополнение к основной мембране из нержавеющей стали. Его вставляют в изолирующие панели на этапе заводского изготовления. В случае выхода из строя первичного барьера, вторичная мембрана обеспечивает герметичность и защищает бетонную стену, предотвращая концентрацию напряжений на бетонном углу, как того требуют европейские стандарты, а именно EN 14620. Благодаря этому TPS GST Мембранное хранилище соответствует тем же функциональным требованиям, что и хранилище, изготовленное из стали с содержанием никеля 9%.

Надежность

Надежность мембранной системы GST впервые подтверждается опытом ее эксплуатации. Более ста судов перевозчиков СПГ, оборудованных системами удержания типа MARK III, успешно работают уже более 40 лет. В настоящее время в эксплуатации находятся 29 наземных хранилищ, первый из которых был построен 30 лет назад. Владельцы терминалов, оснащенных резервуарами для хранения «Технигаз», четко выразили свое удовлетворение по поводу надежности мембранных хранилищ СПГ [3].

Испытания

Успешный опыт GTT в отношении мембранных систем локализации СПГ обусловлен строгой программой контроля на всем протяжении монтажа резервуара. От завершения строительства бетонной конструкции до конца монтажа системы защитной оболочки проводятся многочисленные испытания.[3]

Основные типы испытаний представлены ниже:

- Гидростатическое испытание, как указано в стандартах EN 14620-5;
- Следует отметить, что в случае изготовления хранилища полной герметизации, изготовленное из стали с содержанием 9% Ni, на этой ранней стадии не проводится гидроиспытание, то есть до монтажа системы защитной оболочки.
- Вакуумный бокс для проверки герметичности TPS.
- Тест NH3 (аммиак) для проверки герметичности сварных швов мембраны.
- Глобальный тест, чтобы проверить глобальную герметичность системы сдерживания СПГ.

Эффективный процесс мониторинга

Мембрана плотно соединена со стальным купольным вкладышем таким образом, что изоляционное пространство представляет собой замкнутый элемент. Изоляционные пространства за первичной мембраной и за TPS постоянно вентилируется потоком азота и на выходе из пространства контролируется присутствие в азоте природного газа .

Система мониторинга обеспечивает постоянный контроль изоляционного пространства путем анализа отводимого газа и контроля его температуры. В случае обнаружения следов газа или снижения температуры, концентрация газа снижается путем продувки азотом [3].

Система мониторинга включает в себя:

- датчики температуры, установленные в изоляционном пространстве за основным барьером, на ТЭС и на бетонной конструкции (днище и стены);
- коллекторы, расположенные в изоляционных пространствах, обеспечивают распределение газообразного азота в верху и внизу резервуара;
- форсунки для отбора проб газа, контролирующие концентрацию газа в изоляционных помещениях; пробы газа отбираются последовательно и

автоматически в месте расположения детекторов газа, чтобы полностью отсканировать пространство изоляции.

Все измерения проводятся локально и передаются в DCS (распределенную систему управления). Если будет зафиксировано высокое значение концентрации газа, в диспетчерской будет активирована сигнализация газа. В случае, когда концентрация газа в первичном пространстве достигает более 1,5 об.%, необходимо провести продувку азотом, чтобы уменьшить концентрацию газа. Мембранный бак легче выдерживает сейсмические нагрузки, чем емкости, изготовленные по технологии 9% Ni.

Во время землетрясения внутренняя оболочка 9-% никелевого сплава резервуара подвергается боковым и вертикальным ускорениям. Из-за этого внутренний резервуар (самоустанавливающийся стальной корпус) необходимо закрепить на плите, чтобы предупредить его смещения.

Система хранения состоит из металлических (9% Ni) анкеров, замурованных в бетонную плиту. Поставка анкеров должна опережать график строительства каркаса. Кроме этого, система анкеровки нарушает единство нижней части и это снижает ее прочность.

Мембранная система локализации СПГ для резервуаров-хранилищ такова, что нагрузки, вызванные движениями жидкости, напрямую передаются в бетонный внешний каркас через изоляцию. Поэтому необходимости в специальном закреплении системы защитной оболочки [3].

Преимущества изготовления мембранных хранилищ СПГ

Улучшенная версия мембраны компании Technigaz, GST учитывает опыт эксплуатации 29 наземных резервуаров, уже построенными в Европе и Азии. Мембрана Technigaz была адаптацией мембраны, разработанной для строительства танкеров СПГ, которой успешно оснащены более 20% современного танкерного флота.

Опыт постройки 29 резервуаров для хранения СПГ Technigaz, GTT позволил улучшить конструкцию системы защитной оболочки соответственно новым требованиям европейских стандартов EN 1473 и EN 14620, которые вступили в силу в декабре 2006 года.

Соответствие европейским стандартам было достигнуто благодаря добавлению термозащиты на днище и стенки резервуара высотой до 50 м. На сегодняшний день GST является единственной мембранной системой с физическим (механическим) TPS в соответствии с требованиями стандартов. Адаптированная к внутренней стороне бетонного резервуара в форме многогранника, эта новая компоновка мембраны использует очень мало разных по конструкции элементов и, это обеспечивает более высокий уровень стандартизации [3].

Конструкция GST пригодна для изготовления резервуаров очень большой емкости. Она состоит из стандартных модульных элементов, технология GST® может быть адаптирована к любой конструкции, независимо от ее формы или размера, без каких-либо существенных изменений в конструкции. Уже есть опыт строительства резервуаров с GTT объемом от 20 000 м^3 до 300 000 м^3.

Геометрические размеры мембранного резервуара GST зависят только от емкости и формы каркаса, которая может быть призматической или цилиндрической.

Благодаря упрощенной конструкции с использованием мембраны из нержавеющей

стали толщиной 1,2 мм и модульной элементы, система удержания СПГ значительно оптимизирована. Мембранные элементы расположены так, что процесс

сварки может быть автоматизирован. Разработаны специальные сварочные аппараты, которые выполняют автоматическую сварку гофрированной мембраны.

Целью данной статьи было подчеркнуть преимущества используемой мембранной технологии резервуарах для хранения на суше.

Многолетний опыт работы на море и на берегу доказывает надежность системы. Система двойной защиты и TPS (система тепловой защиты) – гарантия, высокого уровня безопасности мембранной системы герметизации GST.

Литература

1. Буренин В.В., Дронов В.П., Воробьев Е.В. Конструкции насосов для криогенных жидкостей. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1981. – 45с.
2. Gilbarco Veeder-Root Россия [Электронный ресурс]. URL: http://azs-neva.ru/information/doc/LPG Premier.pdf/ дата обращения 15.05.2019.
3. GTT Франция [Электронный ресурс]. URL: https://www.gtt.fr// дата обращения 05.06.2019.

УДК 621.59

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ РФ

С.А. Мигай

Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, Россия

samigaj@gmail.com

Аннотация
В статье рассмотрены перспективы развития малотоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ) на газораспределительных станциях (ГРС) ПАО «Газпром». Произведён анализ возможностей внедрения в газотранспортную систему России СПГ-ожижителей. Приведено обоснование выбора газораспределительных станций в качестве приоритетных объектов газотранспортной системы России для производства СПГ на их базе. Исследованы и приведены наиболее перспективные решения по проектированию СПГ-ожижителей для ГРС ПАО «Газпром». Приведён обзор, анализ и оценка эффективности технологических решений по производству СПГ на ГРС, существующих в Российской Федерации в настоящий момент.
Ключевые слова
Сжиженный природный газ, СПГ, газораспределительные станции, ГРС, магистральный транспорт газа, малотоннажное производство СПГ, ПАО «Газпром».

Малотоннажное производство сжиженного природного газа занимает все более значительное место в структуре производства СПГ. Связано это с расширением областей применения как природного газа, так и СПГ. Проекты малотоннажного производства СПГ в условиях падения цен на нефть и природный газ становятся все более экономически перспективными [1].

На основании анализа зарубежного и отечественного опыта известно, что наиболее выгодным, простым и энергетически эффективным видом малотоннажного производства СПГ является его производство на ГРС, коих в Российской Федерации насчитывается несколько десятков тысяч [2]. Точки производства СПГ должны обладать следующими ключевыми параметрами:

1. Автотранспортная, железнодорожная или судоходная доступность одновременно к большому числу промышленных и коммунальных объектов для доставки СПГ.
2. Наличие источника и достаточный объем природного газа для последующего сжижения.
3. Возможность внедрения энергоэффективного процесса сжижения природного метана.

Исходя из анализа газотранспортной системы России, такими объектами являются газораспределительные станции (ГРС). Являясь конечным звеном магистрального газопровода, ГРС «разбросаны» по всей территории РФ, вблизи крупных городов их количество достигает нескольких десятков. На ГРС природный газ претерпевает снижение давления в различных диапазонах от 7,5 (5,5) МПа до 1,2(0,3) МПа в зависимости от типа станции и газораспределительной сети. Данное редуцирование и возникающий в его результате эффект Джоуля-Томпсона приводят к охлаждению природного газа на несколько десятков градусов Цельсия. Для

предотвращения гидратообразования после редуцирования происходит процесс подогрева газа в огневых подогревателях типа ПГ или в подогревателях с промежуточным теплоносителем типа ПТПГ. В данных подогревателях источником теплоты является подготовленная вода или диэтиленгликоль (ДЭГ), на нагрев которых расходуется также природный газ в количестве 1% от общего объема пропускной способности ГРС [3]. Для энергоэффективного процесса сжижения природного газа предлагается использовать потенциальную энергию газа из магистрального газопровода, которая теряется в процессе его редуцирования. Эта энергия получена от компрессорных станций ПАО «Газпром» с вложением энергетических, материальных и денежных ресурсов. Иными словами, потенциальная энергия магистрального газа имеет вполне определенную «стоимость» и её утилизации без получения вторичной энергии (электроэнергия, «холод» и др.) представляется нерациональной. Предлагается утилизировать потенциальную энергию магистрального газа для энергетически эффективного сжижения природного газа.

В настоящее время существуют два принципиально разных технологических процесса малотоннажного производства СПГ [4]:

1. Технологические процессы сжижения природного газа внешним источником охлаждения.
2. Технологические процессы сжижения, основанные на расширении потока или части потока природного газа.

В данной статье рассмотрены процессы сжижения, основанные на расширении потока природного газа, так как именно они имеют наибольшую значимость для объектов на территории Российской Федерации.

Учитывая достаточно низкий уровень развития рынка СПГ в Российской Федерации, необходимы технологии, позволяющие увеличить рентабельность производства СПГ, снизить его стоимость и начальные капиталовложения. Значительным фактором, не позволяющим повысить рентабельность производства СПГ как раз и являются дорогостоящие технологии очистки газа от ВКК, НКК и азота до концентраций, требуемых по ГОСТ Р 56021-2014 для СПГ категории А [5].

Для решения данных проблем существует множество технологических решений. В статье рассматриваются следующие:

1. Технологическая схема сжижения природного газа на ГРС, основанная на разделении потока газа, поступающего на установку, на две части (двухпоточная схема): на продукционный поток, который собственно сжижается, и на технологический поток, который предназначен для получения холода.
2. Технология использования эффекта газодинамического энергоразделения при одновременном охлаждении природного газа, идущего на сжижение.

Специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» предложена возможность использования упрощённой технологии очистки природного газа для производства СПГ высокого качества с содержанием диоксида углерода в исходном газе(в магистральном трубопроводе) вплоть до 5 % мол.(50000 ppm).Особенность предлагаемой технологии согласно [6] состоит в том, что газ, поступающий из магистрального трубопровода в установку, разделяется на продукционный и технологический потоки, причём продукционный поток предварительно подвергают осушке и очистке от CO2, а технологический поток только осушают (рис. 1). При этом температуру газа на входе в детандер (и, соответственно, на выходе) и давление газа на выходе из детандера подбирают таким образом, чтобы получить достаточно высокий коэффициент сжижения газа и исключить кристаллизацию диоксида углерода после расширения газа в детандере. На рис. 3 приведены расчётные значения коэффициента растворимости CO2 в газе после расширения его в детандере при оптимальных температурах газа перед детандером при производстве СПГ на ГРС. Из этого рисунка следует, что в технологической схеме, представленной на рис. 2, при давлении на входе

в установку 2,5-4,5МПа и давлении за детандером 0,2 МПа растворимость CO2 в газе составляет 50-200ppm (0,005-0,02%). Следовательно, за детандером может происходить кристаллизация диоксида углерода. Однако если давление за детандером повысить до 0,6 МПа (величина давления в распределительном трубопроводе на ГРС), то растворимость CO2 в газе за детандером возрастёт до 1000-2000 ppm. Это значит, что кристаллизация CO2 в технологическом потоке будет отсутствовать при содержании диоксида углерода в исходном газе менее 1000-2000 ppm (0,1-0,2 %). На рис. 2 приведены расчётные значения коэффициентов сжижения и растворимости углерода в газе в зависимости от температуры перед детандером при давлениях прямого потока 3,5 МПа и обратного 0,6 МПа. На рис. 3 приведены расчётные значения коэффициентов сжижения и растворимости углерода в газе в зависимости от температуры перед детандером при давлениях прямого потока 3,5 МПа и обратного 0,6 МПа. Из этого рисунка следует, что в технологической схеме, представленной на рис. 1, при давлении на входе в установку 2,5-4,5МПа и давлении за детандером 0,2 МПа растворимость CO2 в газе составляет 50-200ppm (0,005-0,02%). Следовательно, за детандером может происходить кристаллизация диоксида углерода. Однако если давление за детандером повысить до 0,6 МПа (величина давления в распределительном трубопроводе на ГРС), то растворимость CO2 в газе за детандером возрастёт до 1000-2000 ppm. Это значит, что кристаллизация CO2 в технологическом потоке будет отсутствовать при содержании диоксида углерода в исходном газе менее 1000-2000 ppm (0,1-0,2 %) [7, 8].

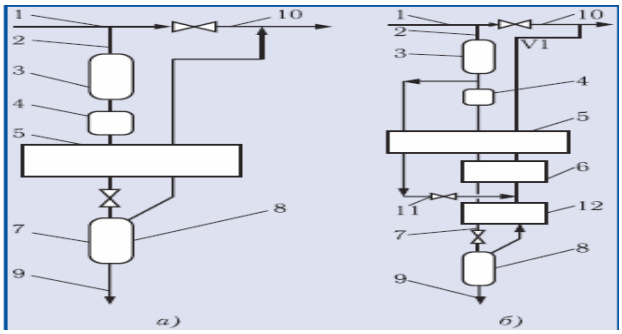


Рис. 1. Однопоточная (а) и двухпоточная (б) схемы дроссельного цикла
1 – магистральный трубопровод; 2– трубопровод прямогопотока; 3 – блок осушки потока; 4 – блок очистки; 5 – предварительный теплообменник; 6 – основной теплообменник; 7 – дроссельный вентиль; 8 – сборник-сепаратор сжиженного газа; 9 – трубопровод выдачи сжиженного газа из установки; 10 – распределительный трубопровод; 11 – дроссельный вентиль технологического потока

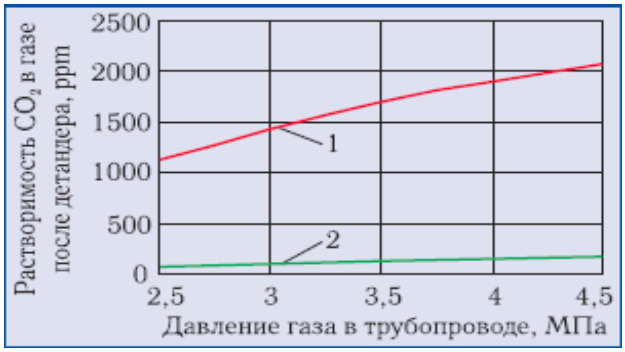


Рис. 2. Растворимость диоксида углерода в газе после расширения в детандере при оптимальных параметрах технологического потока и различных давлениях газа после детандера, МПа: 1 – 0,6; 2 – 0,2

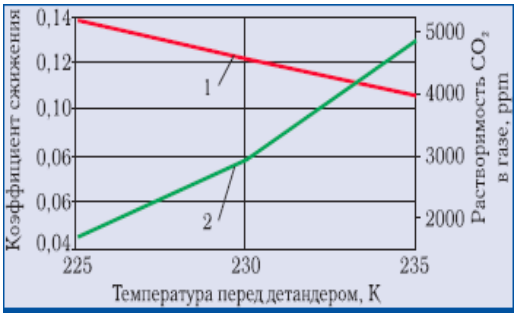


Рис. 3. Коэффициент сжижения (1) и растворимость диоксида углерода в газе (2) в зависимости от температуры перед детандером при давлениях прямого потока 3,5 МПа и обратного 0,6 МПа

Очистка технологического потока газа от CO2 в этом случае может и не требоваться. Таким образом, за счёт перехода к неоптимальным режимам работы и некоторого уменьшения производительности СПГ установки можно снизить стоимость системы очистки газа от диоксида углерода.

Производство СПГ на ГРС по схеме с разделением прямого потока газа, проходящего через установку, на технологический и продукционный потоки позволяет:– при концентрации диоксида углерода в исходном газе до 0,1-0,2 % мол. и давлении газа после расширения 0,6 МПа проводить очистку от CO2 только продукционного потока, что уменьшает стоимость системы очистки газа в 6-10 раз;– в случае содержания CO2 в исходном газе 0,2- 0,6 % мол. ограничиться очисткой только продукционного потока за счёт повышения температуры технологического потока перед детандером выше оптимального значения или повышением давления после детандера, хотя при этом уменьшается производительность установки СПГ, но одновременно снижается стоимость системы очистки;– при концентрации диоксида углерода в исходном газе на уровне 0,5-5 % мол. также ограничиться очисткой только продукционного потока за счёт повышения давления продукционного потока до сверхкритического значения с помощью дожимающего компрессора, что приведёт к снижению стоимости системы очистки в 5-6 раз и обеспечит удовлетворительную эффективность, несмотря на дополнительные затраты на дожимающий компрессор [9].

Технология использования эффекта газодинамического энергоразделения при одновременном охлаждении природного газа, идущего на сжижение.

На рис. 4 представлена принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения [10]. Из общего ресивера газ с параметрами P_0^*, T_0^* поступает в устройство энергоразделения, где часть его разгоняется в сопле Лаваля 1 до сверхзвуковой скорости и движется по центральному каналу до сверхзвукового диффузора 2. Поскольку коэффициент восстановления температуры при течении природного газа меньше единицы [11], то газ, текущий по центральному каналу, нагревается за счет газа текущего по внешнему (кольцевому) каналу. В результате соотношения температур и давлений на входе и выходах из устройства энергоразделения составляют $T_2^* < T_0^* < T_1^*$ и $P_2^* \approx P_0^* > P_1^*$.

Таким образом отпадает необходимость подогрева газа на ГРС и происходит экономия 1% газа. А также газ, идущий по внешнему контуру охлаждается до значительно низкой температуры, сохраняя своё начальное давление, поэтому он может быть направлен на установку сжижения газа, использующую в качестве хладагента поток сжижаемого газа (дроссельная, детандерная, вихревая труба) [11].

Результаты показали, что глубина охлаждения составляет 17–20 K в зависимости от режима работы (больше при номинальном режиме). Данное охлаждение является

недостаточным для устойчивого обеспечения коэффициента сжижения 15–20% в летнее время. Нагрев редуцируемого газа также оказывается недостаточным, и в зимние месяцы требуется использование огневых подогревателей. При этом если учесть конденсацию высших углеводородов в сверхзвуковом канале (что приводит к дополнительной интенсификации теплообмена) и предусмотреть возможность нанесения регулярного рельефа на стенки, разделяющие сверхзвуковой и дозвуковой потоки, то при тех же соотношениях массовых расходов можно обеспечить охлаждение дозвукового потока на 30–34 K (больше при номинальном режиме).

Данный уровень “захолаживания” гарантирует получение коэффициента сжижения не ниже 20% круглогодично. Если учесть технологическое снижение реального коэффициента сжижения в установке за счет теплопритока из окружающей среды при номинальном расходе природного газа на входе в установку 10000 нм^3/ч и температуре окружающей среды не выше +30 °C, выход СПГ составит 1.2 т/ч (1 716 нм^3/ч). Остальной газ с давлением 0.6 МПа (8284 нм^3/ч) будет передан в газораспределительную сеть и его температура будет соответствовать требованиям СНиП 42-01-2002. При минимальном расходе природного газа на входе в установку (2200 нм^3/ч) выход СПГ составит 0.2 т/ч.

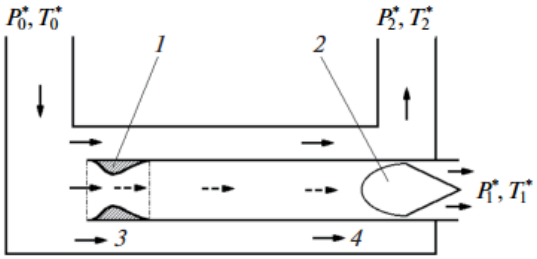


Рис. 4. Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения: 1 – сопло Лаваля; 2 –сверхзвуковой диффузор; 3 – дозвуковой поток газа; 4 – сверхзвуковой поток газа

Литература

1. Энергоресурсы, топливо/ Сжиженный природный газ (СПГ) Электронный журнал Neftegaz.ru, 2017 http://neftegaz.ru/tech_library/view/4056-Szhizhennyj-prirodnyj-gaz-SPG С. 3 – 5.
2. Фёдорова Е.Б., Мельников В.Б. / Основные проблемы малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа/ Технические науки №4 (277) с. – РГУ нефти и газа имени Губкина, Минобрнауки РФ, – 2014 г., с. 112-123.
3. Кузьменко И.Ф. / Тенденции развития СПГ-установок средней производительности для организации газоснабжения, – «Газпром ВНИИГАЗ» – 2014 г., 56 с.
4. Фёдорова Е.Б. / Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2011. – 159 с., ил.
5. ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия.
6. «Способ сжижения природного газа и установка для его реализации». Заявка на изобретение ООО «ВНИИГАЗ» № 2007. 125.077.106 от 04.07.2007 г.
7. Горбачёв С.П., Люгай С.В., Самсонов Р.О. / Технология производства СПГ на газораспределительных станциях при повышенном содержании диоксида

углерода в сетевом газе. «Газпром ВНИИГАЗ», Журнал «Технические газы», №3, 2010, с. 48-52

8. Майорец М., Симонов К. Сжиженный газ – будущеемировой энергетики. М.: Альпина Паблишер,2013. 360 с. 5.
9. Горбачёв С.П., Люгай С.В., Самсонов Р.О. / Технология производства СПГ на газораспределительных станциях при повышенном содержании диоксида углерода в сетевом газе. «Газпром ВНИИГАЗ», Журнал «Технические газы», №3, 2010, с. 48-52.
10. Бурцев С.А., Карпенко А.П., Леонтьев А.И. / Метод распределенного получения сжиженного природного газа на газораспределительных станциях. Журнал «Теплофизика высоких температур», 2016, том 54, №4, с. 605-608.
11. Сергель О.С. / Прикладная гидрогазодинамика: учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с., ил.

УДК 621.593

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)

Е.С. Середенко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Seredenko_alena@mail.ru

Аннотация

В данной работе предложена модель для прогнозирования испарения СПГ, хранящегося в резервуарах регазификационных терминалов, объединяющая строгую термодинамическую модель парожидкостного равновесия СПГ и реалистичную модель теплопередачи.

Предложенный метод обеспечивает ряд достижений в сравнении с ранее разработанным моделям, поскольку: проникновение тепла рассчитывается на основе температуры наружного воздуха и состава СПГ, что допускает суточные или сезонные колебания; коэффициент выкипания не является входным параметром, а рассчитывается как часть моделирования, и плотность СПГ оценивается с использованием точной экспериментальной корреляции.

Ключевые слова

СПГ, испарение, регазификация, хранение, резервуары, модель, прогнозирование, оценка.

Проблема испарения СПГ на сегодняшний день

Испарение компонентов сжиженного природного газа (СПГ) – это одна из проблем, с которой сталкиваются участники рынка СПГ.

Во время морских перевозок при испарении компонентов газа, состав СПГ не только меняется и не всегда соответствует заявленному, уменьшаются и объемы газа в танкере – газовозе. Разница между температурой окружающей среды и СПГ приводит к постоянному процессу регазификации (выкипанию, испарению) метана до газообразного агрегатного состояния. На Западе такой газ получил название Boil-off gas – BOG, в РФ – это отпарной газ.

Сначала выкипают более легкие компоненты, имеющие низкую температуру кипения. Доставленный СПГ при регазификации имеет большую плотность, чем при загрузке в танкер-газовоз, ниже % содержания метана и азота, но выше % содержания этана, пропана, бутана и пентана.

Проблема решается с помощью установки повторного сжижения отпарного газа (УПСГ), представляющей собой отдельные линии с BOG компрессорами, в которой повторное сжижение метана автоматизировано идет за счет отвода теплопритоков в окружающую среду [1].

Прогнозирование испарения существующими методами

Прогнозирование испарения СПГ имеет особое значение для отрасли, особенно при отгрузке СПГ и эксплуатации установок регазификации. При доставке СПГ прогнозирование испарения помогает предвидеть распределение грузов СПГ и заранее настроить работу приемного терминала.

В терминале регазификации точная оценка испарения позволяет заранее планировать рабочие процедуры и обеспечить пригодность поставляемого природного газа с точки зрения его физических свойств и теплотворной способности.

Проблема была незначительной для установок регазификации в терминалах с базовой нагрузкой, в отличии от установок с пиковыми нагрузками; однако колебания региональных цен на газ и сезонность в совокупности приводит к увеличению времени хранения, поэтому точный прогноз испарения становится важным при оценке хранимого СПГ для поставки его конечным потребителям в положенные сроки.

Для хранимого СПГ количество и качество продукта зависит от исходного состава, изоляции резервуара СПГ и, в первую очередь, от времени, прошедшего с момента наполнения резервуара.

Самые длительные поездки - порядка 20 дней, во время них испаряется 2-3% от общего объема транспортируемого СПГ. Обычный подход для прогнозирования испарения СПГ во время морской перевозки заключается в предположении постоянной скорости выкипания (BOR), где BOR определяется как отношение объема СПГ в жидком состоянии, испарившегося за один день к начальному объему СПГ в резервуаре. Показатель BOR, используемый в промышленности для перевозки СПГ, зависит конструкции судов-перевозчиков. Для более мелких и старых судов обычно используется BOR 0,15% [2], в то время как для последних танкеров СПГ со средней вместимостью 170 000 м^3 BOR ближе к 0,1%.

Для прогнозирования испарения в надземных резервуарах для хранения СПГ, обычно используемых в регазификационных терминалах, ситуация несколько иная. Постоянное значение BOR, как правило, предполагается на основе значения, принятого на этапе проектирования, когда указывается максимальное значение BOR, обычно около 0,05% [3], и изоляция резервуара проектируется соответствующим образом.

В научной работе представлена модель, предназначенная для прогнозирования скорости испарения и изменения состава сжиженного природного газа, хранящегося в надземном резервуаре с полной защитной оболочкой.

Модель разработана путем интеграции строгой модели парожидкостного равновесия СПГ (VLE) и реалистичной модели теплопередачи.

Разработка модели

Рассмотрим разработку модели испарения СПГ в типичном надземном резервуаре-хранилище, схематически показанную на рисунке, которая используется в промышленности для хранения СПГ.

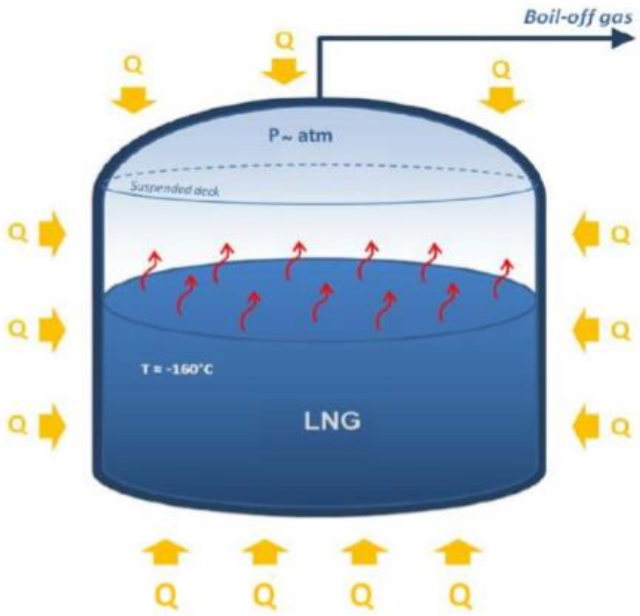


Рисунок. Схема резервуара для хранения СПГ

По мере того как тепло проникает в хранимый СПГ, оно вызывает испарение более легких компонентов, при этом образующийся пар (BOG) удаляется для контроля давления в резервуаре. Энергетический баланс в резервуаре для хранения связывает количество тепла, поступающего в резервуар за единицу времени, Q, со скоростью удаления пара, и может быть просто выражен, как:

$$Q_{in} = \frac{dH_V}{dt} + \frac{dH_L}{dt} + \dot{B}h_V \quad (1)$$

где H и h – молярные энтальпии, тогда как индексы V и L указывают на пары и жидкость соответственно.

Принимая во внимание, что объем резервуара постоянен и учитывая скорость удаления паров:

$$\frac{1}{\rho_V}\frac{dB}{dt} = \frac{dV_V}{dt}\left(\frac{\rho_L}{\rho_V} - 1\right) - \frac{V_V}{\rho_V}\frac{d\rho_V}{dt} - \frac{V_L}{\rho_L}\frac{d\rho_L}{dt} \quad (2)$$

где ρ – молярная плотность, V – объем резервуара для хранения, занятый жидкостью V_L и паром V_V, dV_V/dt – скорость испарения СПГ.

Поступление тепла в резервуар для хранения включает передачу тепла через боковые стенки, крышу и нижнюю плиту. В промышленных резервуарах нижняя плита резервуара поддерживается при постоянной температуре с использованием электрического нагревательного элемента и датчиков температуры, чтобы предотвратить замерзание грунта. Таким образом, в существующей модели теплопередача через дно резервуара предполагалась постоянной и не зависящей от температуры окружающей среды. В большинстве промышленных резервуаров внешняя секция крыши отделена от резервуара изолированной подвесной палубой. Пространство между крышей и подвесной палубой заполнено BOG. Таким образом, при разработке данной модели испарения тепловой поток через крышу резервуара также считался постоянным и не зависел от температуры наружного воздуха.

Поступление тепла через стенки резервуара зависит от температуры окружающего воздуха и уровня жидкости в резервуаре. Поскольку передача тепла от окружающего воздуха внутрь резервуара происходит путем сочетания проводимости и конвекции, можно записать выражение для Q как:

$$Q = U.A.\Delta T = (U_{wet}A_{wet} + U_{dry}A_{dry}) \cdot (T_{air} - T) \quad (3)$$

где U – общий коэффициент теплопередачи, A – площадь контакта, нижние индексы *wet* (мокрый) и *dry* (сухой) относятся к секции бака, заполненной жидкостью и паром, соответственно. Здесь мы предполагаем, что пар и жидкость внутри резервуара находятся в равновесии при температуре T, в то время как воздух снаружи находится при температуре T_{air}.

Уравнения (1), (2), (3) составляют рабочую модель. Прежде чем их можно будет использовать для расчета испарения СПГ, они должны быть дополнены термодинамической моделью, которая обеспечит изменение энтальпии и плотности пара и жидкости со временем.

Термодинамическая модель

Т.к. СПГ состоит в основном из метана с небольшим количеством этана и небольшого количества азота, пропана и бутанов, при нагревании присутствие других компонентов, даже в небольших количествах, приводит к преимущественному

испарению легких компонентов и увеличению количества более тяжелых компонентов в оставшемся СПГ. Со временем меняются не только термодинамические свойства СПГ, но и температура его кипения. Чтобы должным образом учесть эти явления, мы должны рассчитать состав паровой и жидкой фазы как функцию времени. Для этого мы предполагаем, что две фазы находятся в термодинамическом равновесии, и проводим расчеты парожидкостного равновесия (VLE). Чтобы разработать как можно более реалистичную модель испарения СПГ, мы получаем константы равновесия из соотношений коэффициентов летучести φ_i двух фаз, а именно:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\varphi_i^L}{\varphi_i^V} \tag{4}$$

где y и x – мольные доли частиц i в паровой и жидкой фазе соответственно. Коэффициенты летучести, ϕ_i, получены из уравнения состояния Пенга-Робинсона (PR-EOS),

$$(\mathrm{P} + \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)})(v-b) = RT \tag{5}$$

где a и b – эффективные параметры [4].

Плотность паровой фазы получается путем решения PR-EOS (ур. 5) для заданного давления и температуры. Используем метод Клозека-Маккинли, так как он был специально разработан для оценки плотности СПГ [5]. Это надежный и точный метод, рекомендуемый Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié - GIIGNL (Международная группа импортеров сжиженного природного газа) и ISO 6578. Он учитывает составы и температуры кипения, поэтому представляет большой интерес для промышленности СПГ с заявленной погрешностью ± 0,1%, при условии, что содержание азота или бутана не превышает 4%. Метод основан на эмпирической корреляции для молярного объема смеси СПГ:

$$v = \sum_i v_i x_i - [k_1 + (k_2 - k_1)\left(\frac{x_{N2}}{0{,}0425}\right)]x_{C1} \tag{6}$$

где k_1 и k_2 – поправочные коэффициенты, зависящие от температуры, v_i – молярный объем.

Молярные энтальпии каждой фазы могут быть связаны со свойствами PVT посредством остаточной энтальпии:

$$\frac{h-h^{id}}{RT} = Z - 1 + \frac{1}{RT}\int_{\infty}^{v}\left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right]dv \tag{7}$$

где h^{id} – энтальпия идеального газа;

Подставляя PR-EOS ур. (5) в правую часть уравнения (7) получаем:

$$\frac{h-h^{id}}{RT} = Z - 1 - \frac{1}{2\sqrt{2}bRT}\left(a - T\frac{da}{dT}\right)ln(\frac{v+(1+\sqrt{2})b}{v+(1-\sqrt{2})b}) \tag{8}$$

Следовательно, можно оценить молярную энтальпию при данной температуре и плотности из параметров PR-EOS и значения коэффициента сжатия Z ($Z = Pv / RT$).

Результаты

В данной работе рассмотрена модель прогнозирования испарения сжиженного природного газа (СПГ), объединяющая строгую термодинамическую модель парожидкостного равновесия и реалистичную модель теплопередачи.

За счет применения модели прогнозирования можно повысить качество транспортируемого продукта, оптимизировать работу регазификационных терминалов, обеспечить надежность поставки СПГ потребителям.

Для существующих резервуаров СПГ, используемых в хранилищах и регазификационных установках, можно, основываясь на анализе, проведенном в этой работе, разработать эмпирическое правило, согласно которому изменение температуры окружающей среды на 1 °C приведет к изменению BOG на 0,2%.

Литература

1. Neftegaz.ru. Транспортировка сжиженного природного газа (СПГ) морскими танкерами-газовозами. Загрузка и регазификация [Электронный ресурс] URL: https://neftegaz.ru//дата обращения 05.05.2019.
2. Colson D, Haquin N, Malochet M. Снижение испарения в грузовых танках газовозах - последние разработки систем удержания грузов «Газтранспорт и Технигаз» (GTT). 25-я Всемирная газовая конференция, Куала-Лумпур; 2012.
3. Yang Y, Kim J, Seo H, Lee K, Yoon I. Разработка крупнейшего в мире надземного резервуара для хранения СПГ. Корейская газовая корпорация. 23-я Всемирная газовая конференция, Амстердам; 2006.
4. Danesh A. PVT и фазовое поведение нефтяных пластовых флюидов. Нидерланды: Elsevier Science; 1998.
5. Справочник по депозитарному переводу СПГ. Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié (GIIGNL), 3-е изд. Париж: GIIGNL; 2010.

УДК 621.593

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОГРУЖНОГО НАСОСА ДЛЯ СПГ

Е.В. Соколова, Т.С. Зайцева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

evlogvinenko@corp.ifmo.ru, **ururuolololooo@mail.ru**

Аннотация

Значимую роль в производственном цикле СПГ завода занимают криогенные насосы, без которых невозможно осуществить погрузку СПГ в танк судна-газовоза, отправить на хранение по продуктовым линиям. Эксплуатационная среда несет в себе ряд преимуществ, позволяющих увеличить энергоэффективность насоса и ряд других характеристик. Насос полностью погружен в рабочую среду (что также влияет на снижение количества шума - его поглощает СПГ), используется при криогенных температурах, что обеспечивает его постоянное охлаждение, отсутствие негативных воздействий от внешней среды и меньшие размеры из-за усовершенствованных электрических свойств материалов. Использование погружных насосов может оптимально задействовать пространство предприятия. Погружной насос отличается от непогружных насосов своей базовой конструкцией, которая не допускает причины, связанных с большинством сбоев непогружных насосов, что в совокупности приводит к снижению возникновения риска аварийных ситуаций и нагрузок на насос.

Ключевые слова

Сжиженный природный газ, погружные насосы, криогенные температуры, энергоэффективность.

Сжиженный природный газ (СПГ) отправляется на хранение с установок сжижения по продуктовым линиям с помощью перекачивающих насосов. Он хранится в танках или резервуарах при температуре около 433К и давлении немного превышающим атмосферного [1]. На рисунке представлена типовая конструктивная схема погружного насоса на примере шнекоцентробежного насоса фирмы «Картер» (США).

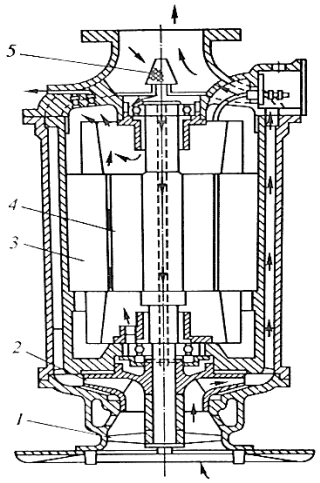


Рисунок. Конструктивная схема погружного насоса фирмы «Картер» (США) [2]:
1 – шнек; 2 – лопастное колесо; 3 – статор; 4 – ротор; 5 – фильтр очистки

Погружные насосы полностью находятся внутри рабочей среды (двигатель полностью находится в перекачиваемой жидкости и постоянно омывается криогенной жидкостью), поэтому актуальной задачей является обеспечение их надежности, взрывозащищенности. Для этого используют такие конструкционные материалы, как латунь, бронза, монель. Часто моторно-насосная секция защищена кожухом из нержавеющей стали, электрические компоненты герметизируют высоконадежным эпоксидным компаундом и монтируют в колонне моторного отсека. Специально закаленные цапфы подшипников мотора производят из нержавеющей стали, подшипники - из карбоно-графитового сплава [3].

Чаще всего на производстве используют насосы погружного и непогружного типа. Первые имеют отличия в своей конструкции, благодаря чему исключены причины, которые связанны с большинством поломок непогружных насосов:

- Отсутствие уплотнения вала. И механические, и бесконтактные уплотнения изнашиваются или могут быть повреждены из-за ошибок персонала, становятся источником утечки в режиме ожидания уплотнения, вследствие чего загрязняется окружающая среда или создается риск аварийной ситуации.
- Отсутствие упорных подшипников и зависимой системы смазки подшипников. Упорные подшипники по своей конструкции становятся причиной уменьшения времени работы оборудования. Длительность их работы взаимосвязана с необходимостью постоянного контроля и технического обслуживания персонала предприятия, и к тому же затрат на потребление смазочных материалов. Кроме издержек на смазочные материалы в криогенных установках необходимо предохранять данный узел от обледенения и замерзания, учитывая и эти дополнительные затраты. Все силы в погружном насосе, которые действуют на подшипники, уравновешиваются с помощью соответствующей конфигурации дислокации ротора и рабочих колес, тем самым разрешает подшипникам работать в улучшенных условиях и увеличивает операционный срок жизни насоса. Почти незаметная нагрузка на подшипники позволяет теоретически обеспечить их неограниченный срок службы.
- Отсутствие вала между насосом и теплым двигателем позволяет избежать рисков выравнивания нагрузок на насос во время его установки. Тепловая деформация является риском возникновения эксцентриситета вращающегося узла и, как следствие, дополнительного трения в процессе захолаживания или повышенной вибрации во время эксплуатации оборудования.
- Работа при таких низких температурах позволяет уменьшить размеры двигателя благодаря улучшенным электрическим свойствам материалов, используемых при производстве оборудования. Так как двигатель полностью находится в перекачиваемой жидкости, отсутствуют негативные воздействия внешней среды, являющиеся причиной ухудшения условий работы или отказов системы изоляции.

Как указано выше, имеются значительные различия в конструкции двух видов насосов, что приводит к разнице их рабочих характеристик. Погружные насосы имеют меньший уровень шума, чем непогружные, так как рабочая среда в данном случае служит как поглощающий шум буфер. Как правило, для погружных насосов используются корпуса с экранно-вакуумной изоляцией, и поэтому уровень шума становится практически нулевым. Звуковые колебания в вакууме не передаются. Вакуумная изоляция кроме своей основной функции – резкого уменьшения теплопритоков, также осуществляет вспомогательный эффект звукоизоляции дополнительно и для службы эксплуатации. Кроме того, погружные насосы позволяют более оптимально использовать пространство предприятия. Их монтаж возможен около резервуара, так и на расстоянии от него, над и под землей, без ухудшения эксплуатационных характеристик [3].

После поступления СПГ на предприятие, он отправляется на хранение. СПГ хранится в переохлажденном виде (температура 434К) при небольшом избыточном

давлении, постоянно поддерживаемом на этом уровне, близким к атмосферному, в цилиндрических резервуарах (вертикальных или горизонтальных) с небольшим объемом до 250 м^3, и сферических – объемом до 1440 м^3. Хранение СПГ в резервуарах проводится с периодическим или постоянным газосбросом возникающих паров и их удалением на утилизацию или на факельное устройство (на свечу). В любом из вариантов давление в резервуаре не должно становиться ниже 0,11 МПа. [4]

Важную роль насосы играют не только в хранении СПГ, но и для подачи из хранилищ потребителю. Имеется два способа выдачи СПГ из резервуаров потребителю: вытеснительный и насосный [5]. При вытеснительном способе выдачи СПГ потребителю паровое пространство хранилища-резервуара наддувается газифицированным природным газом из СПГ до давления, которое необходимо для поставки выдачи СПГ по центральному трубопроводу в бак потребителя. Использование вытеснительного способа немного повышает затраты конструирования системы заправки и эксплуатационные расходы за счет весомых потерь СПГ на наддув хранилища.

При насосном способе выдачи СПГ потребителю в резервуаре создается лишь небольшое избыточное давление, которое позволяет исключить кавитацию в работе насосного агрегата. Поэтому при термостатировании СПГ может поставляться в баки потребителя и сливаться из них в одно и то же хранилище.

Сжиженный природный газ не используется в жидком виде. Ожижение используется только для хранения, накопления и транспортировки. СПГ перед подачей в газораспределительную сеть или же в газовые приборы подвергается регазификации [6]. Регазификация – это обратный процесс перехода углеводородов из жидкого состояния в газообразное при испарении или кипении жидкой фазы и дальнейшего перегрева образовавшихся насыщенных паров. Свойства газа во время этого процесса не меняются. Регазификационный терминал включает следующее основное оборудование:

1. резервуар-хранилище СПГ;
2. устройство выдачи СПГ;
3. атмосферный испаритель;
4. взрывозащищенный электрический подогреватель газа;
5. регулирующий газовый щит;
6. модуль аккумуляторов газа;
7. насосное оборудование;
8. системы автоматики;
9. системы безопасности [7].

Для постоянного протекания *процесса регазификации* требуется непрекращающийся приток теплоты к паровой и жидкой фазам. Отбор паров производится через регулятор давления. Минимальное давление в испарителе связан с потерей давления в регуляторе и дистрибутивном газопроводе при необходмости фиктивного давления используемых приборов. Например, для пропана самое малое давление в испарителе может быть в пределах 0 2 - 1 МПа, соответствующей температуре жидкого пропана от 248 до 303 К. При такой температуре теплоносителем может стать жидкость или газ, которые имеют большую температуру [8].

Регазификационные станции СПГ высокого и среднего давления проектируют в зависимости от требуемого рабочего давления на выходе. Для выдачи газа для коммунальных и промышленных объектов необходимы станции среднего давления. Рабочее давление в трубопроводе должно совпадать с рабочим давлением криогенного резервуара. При необходимости производить заправку баллонов высокого давления используют станции высокого давления. Для этого также устанавливается криогенный поршневой насос, модули аккумуляторов газа высокого давления и испаритель. Можно

совмещать и одновременно использовать ресурс СПГ из хранилища на выдачу газа как со средним, так и с высоким давлением.

Литература

1. Архаров А.М., Буткевич И.К. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты – 2-е изд., испр. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 499 с.
2. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина,2011. – 159 с.
3. Слободов Е.Б., ТС-34. Особенности и преимущества погружных центробежных криогенных насосов // Gasworld Россия и СНГ. – 2016 – №47 – С. 24–27.
4. Перспективы и опыт применения СПГ на объектах народного хозяйства. М.: ИРЦ Газпром, 2004 г.
5. Архаров А.М., Кунис И.Д., Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 252 с.
6. Байков Н.М., Сайфеева Т.А. Производство и использование сжиженных газов за рубежом (Обзор зарубежной литературы) - М.: ВНИИОЭНГ, 1974. – 85 с.
7. Сафаров А. Э. Регазификация СПГ / Сафаров А.Э. // Gasworld Россия и СНГ. – 2018. – № 3. – С. 44-46.
8. Гольянов А.И. Газовые сети и газохранилища. Учебник для Вузов. – Уфа: ООО Издательство научно-технической литературы Монография, 2004. – 303с.

УДК 621.59

СИСТЕМА КРИОСТАТИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

Д.А. Хрустовская, А.Ю. Баранов, А.В. Глушаев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

dkhrustovskaia@itmo.ru

Аннотация

В XIX веке датский ученый Камерлинг-Оннес обнаружил, что при значительном снижении температуры ртуть фактически теряет свое электрическое сопротивление. Это открытие положило начало изучению эффекта сверхпроводимости. Предполагалось, что сопротивление металлов линейно зависит от температуры, и при определенном значении температуры металл становился диэлектриком. Но, как оказалось, при понижении температуры, сопротивление стремится к постоянному значению, а у некоторых металлов вообще исчезает. Температура, при которой сопротивление исчезает, зависит от напряженности магнитного поля.

Долгое время ученые полагали, что сверхпроводимость означает только отсутствие электрического сопротивления в веществе. Если приложить магнитное поле к любому проводнику, то его часть будет проводить через этот проводник. Но в 1933 г. ученые В. Мейснер, Р. Оксенфельд и Ф. Хайденрейх доказали, что проводник, переходя в сверхпроводящее состояние, полностью вытесняет магнитный поток, даже если он погружен полностью в магнитное поле [2].

Применение явления сверхпроводимости произвело бы революцию в энергетике, так как была возможность избавиться от потерь электроэнергии при передаче ее по кабелю. Но, из-за того, что это физическое явление было активно только при температуре жидкого гелия, исследования и практическое применение сверхпроводимости продолжительное время оставалось без внимания. Это продолжалось до того момента, пока в 1986 году сотрудники компании IBM Карл Мюллер и Георг Беднорц не открыли высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). С тех пор, сверхпроводимость и ее применение стало перспективным направлением исследований [3].

Прошло 30 лет, оказалось, что в первые образцы ВТСП обладали сверхпроводимой способностью, но были крайне ограничены по силе тока, то есть у них не было сопротивления до определенной силы тока. То есть они обладали сверхпроводящими свойствами в ограниченном диапазоне силы тока [4].

Ключевые слова

ВСТП, сверхпроводники, высокотемпературные сверхпроводники, энергетика, криогеника, физика низких температур, HTSC, superconductors, cryogenics, high temperature supercoductivity.

ВТСП применяются в разных областях науки и техники: от магнитно-резонансной томографии до физики высоких энергий. Самые распространенные системы высокотемпературной сверхпроводимости используются в сверхпроводящих магнитных системах (локализованные сверхпроводящие системы) и распределенных сверхпроводящих системах (кабели и т.п., когда криогенное устройство является центром, а цель – токоведущие линии, они растянуты в пространстве).

Долгое время были востребованы системы со сверхпроводящими магнитами:

1. Магниты для научных исследований.

2. Магнитные системы для ускорительной техники и для термоядерного синтеза.
3. Магнитная сепарация для обогащения руд.
4. Магнитная очистка воды.
5. Магнитный подвес.
6. Индуктивный нагрев.
7. Индуктивные накопители электроэнергии.

Охлаждать такие системы можно с помощью стационарных и мощных источников холодопроизводительности.

А для распределенных ВТСП задача охлаждения обстояла иначе, так как они распределены в пространстве. Например, они вытянуты в кабель, поэтому площадь тепловой изоляции на единицу длины несопоставимо больше, чем у локальных ВТСП систем, что создает повышенные нагрузки на систему криостатирования, что мешает использовать локальные и мощные источники холодопроизводительности.

На рынке представлены ВТСП проводники второго рода. С каждым годом их производство увеличивается, падает цена единицы длины проводника. Критический ток ВТСП зависит от температуры и внешнего магнитного поля. Достаточно высокий критический ток в проводнике достигается при температурах ниже температуры кипения азота и выше температуры кипения неона. Для ВТСП электродвигателя оптимальная температура лежит на уровне 40 К. Это позволяет уменьшить количество проводника и создавать в двигателе мощное магнитное поле. Жидкий неон слишком дорогой газ, а жидкий азот не может поддерживать такую температуру, отсутствие доступного криоагента в значительной степени сдерживает внедрение. Проблема криостатирования ВТСП играет определяющую роль. Реально говорить о промышленном строительстве сверхпроводящих сетей можно только после решения задачи криостатирования. И сейчас такие работы ведутся. ПАО «ФСК ЕЭС» в рамках НИОКР построила сверхпроводящую линию 2,5 км с криостатированием посредством гелиевого ожижителя. Рефрижератор технологически привязан к отдельной точке трубопровода (энергопровода), который нужно охлаждать по всей длине. Продолжается поиск альтернативных решений. В МАИ разработали рефрижератор, работающий на неоне, который обладает достаточной холодопроизводительностью и компактностью, и при дальнейшей доработке может быть выполнен в виде моноблока [1]. Такой моноблок можно будет размещать вдоль энергопровода, таким образом снять вопрос о том, как подавать жидкий азот на большие расстояния. При перегреве провода на 5 К/км получаются достаточно большие холодопотери.

Снабжение ВТСП кабеля криоагентом от точечного источника невозможно. Распределенные ВТСП устройства нужно охлаждать посредством локальных распределенных рефрижераторов.

Необходимо определить требования к системе, которая удалена от населенных пунктов и должна работать без технического обслуживания, получать энергию от самого кабеля. Следует подобрать термодинамическое решение, которое удовлетворит перечисленные требования. Образцом такого рефрижератора можно считать КПМ ЗИФ 1000. Но машины такого класса имеют маленький ресурс (20.000 часов) и нуждаются в обслуживании.

Можно определить требования к идеальному рефрижератору: автономность, большой ресурс, максимальная продолжительность периода между техническими обслуживаниями рабочее вещество, герметичность, и попытаться подобрать готовые технические решения.

Этим требованиям соответствует газовая холодильная машина, которая использует агрегат турбодетандер/турбокомпрессор. Такая машина может работать автономно, герметична.

Факультет низкотемпературной энергетики Университета ИТМО получил предложение о научном сотрудничестве разработке турбохолодильного агрегата, работающего по циклу турбохолодильной машины. Задача университета заключается в разработке системы переохлаждения азота, оценке общей тепловой нагрузки, разработке и составления технологической схемы рефрижератора. Технологическая схема и диаграмма T-S процессов в рефрижераторе изображены на рисунке ниже.

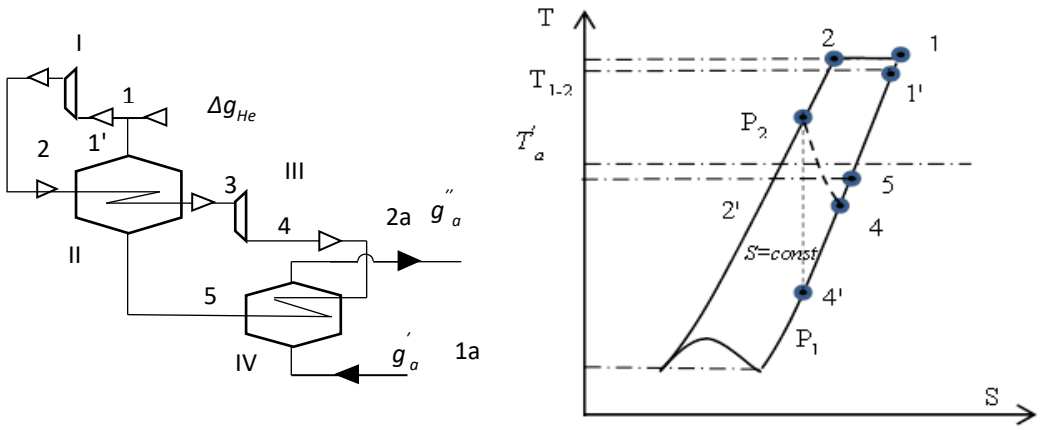


Рисунок. Технологическая схема и T-S диаграмма турборефрежиратора

Поток жидкости нужно переохладить на 10-15 К за счет отвода теплоты к рабочему веществу рефрижераторного цикла, которое разделено с теплоносителем теплопередающей поверхностью. Для этого используются двухпоточные теплообменники.

Поддержание ВТСП кабеля на критическом уровне температур осуществляется за счет использования недогретого жидкого азота. Азот нужно охладить не ниже температуры плавления, иначе он перейдет в твердое состояние и не сможет двигаться по трубопроводу (верхняя граница 75 К). Традиционные криогенные технологии его не закрывают.

Нужно разработать криостат, по которому движется жидкость, охлаждающая кабель. Вторая задача: разработать систему охлаждения, которая будет подавать в криостат недогретую жидкость.

Обзор литературы по теме исследования показал, что в вопросах конструирования криостатов доминируют специалисты по передаче энергии и конструированию сверхпроводников. Поэтому конструкции криостатов не эффективны с точки зрения теплофизики. Например, при передаче трехфазного тока каждая жила располагается в отдельном криостате, соответственно теплопритоки из окружающей среды в 3 раза больше возможного.

Криостаты изготовлены из гофрированной трубы. С точки зрения укладки кабеля это оптимальное дешевое решение. Но такая труба создает колоссальное гидравлическое сопротивление и увеличивает теплоты излучения. Данная магистерская работа посвящена проектированию системы криостатирования, восстановлению/регенерации азота-теплоносителя, чтобы можно было его охладить и вернуть обратно в недогретом состоянии в рециркуляцию.

Научное сотрудничество факультета с машиностроительной компанией, которая предлагает создать рефрижераторный узел на базе неона и уже достаточно далеко

продвинулись в своих исследованиях, но самым узким конструктивным местом в данный момент является теплообменное устройство, потому что машины из-за своей высокооборотности (около 100000 оборотов в минуту) остаются компактными. Но тепловая нагрузка на него достаточно велика, поэтому реализуемость этой программы будет зависеть от того, насколько удачно будет сконструирован рекуперативный теплообменник, который будет отводить теплоту от циркулирующей жидкости к газообразному неону.

Так как подходим к вопросу мы фундаментально, сейчас отрабатывается методика автоматизированного расчета теплообменного аппарата, у которого один поток представляет собой газообразный неон при давлении, близком к атмосферному, так как на давлении, близком к атмосферному, настаивают машинисты, потому что турбодетандер с газовыми подшипниками не может работать при повышенном давлении. Второй поток либо жидких азот, ниже температуры насыщения, либо в следующих итерациях пары СПГ или конденсирующийся азот. Предлагается отработать алгоритм расчета на простых теплообменных устройствах (кожухотрубный теплообменник), запустив азот в трубы, а газ в межтрубное пространство.

Самое главное, что наличие такой модели позволит смоделировать динамический процесс, то есть выделение теплоты в кабеле всегда будет чуть меньше, чем холодопроизводительность в рефрижераторе, поэтому рефрижератор будет работать в режиме периодических отключений. Соответственно, прекращение отвода теплоты будет приводить к постепенному разогреву теплообменника, что вызовет необходимость его включения. Таким образом, после предварительных расчетов будет выстроена модель всего рефрижераторного узла. Дальнейшее исследование будет состоять из подбора различных видов кабеля и оптимизация конструкции.

Литература

1. Костюк В.В. Система криообеспечения высокотемпературной проводимости устройств (СКР 001) / В.В. Костюк, Б.И. Каторгин, В.П. Фирсов и др. // Инженерный журнал: наука и инновации, №8, 2017. – с. 1-27.
2. Слейт А.У. Высокотемпературные сверхпроводники: Пер. с англ. / Под ред. Нелсона Д., Уиттинхема М., Джоржда Т. // М.: Мир, 1988. – 400с.
3. Вольски Алан М. Новые сверхпроводники: перспективы применения/Алан М. Вольски// Scientific American. – 1989. – 4 апреля.
4. Максимов Е.Г. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние [Электронный ресурс] / Максимов Е.Г. // Успехи физических наук. – 2000. – октябрь. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ufn&paperid=1805&option_lang=rus// 04.04.2019.

УДК. 621.6.057

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРИОГЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИЗОЛЯЦИИ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ЗАВОДОВ КРУПНОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)

Ю.Э. Ярославова, А.Ю. Баранов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

olgayaroslavova96@gmail.com

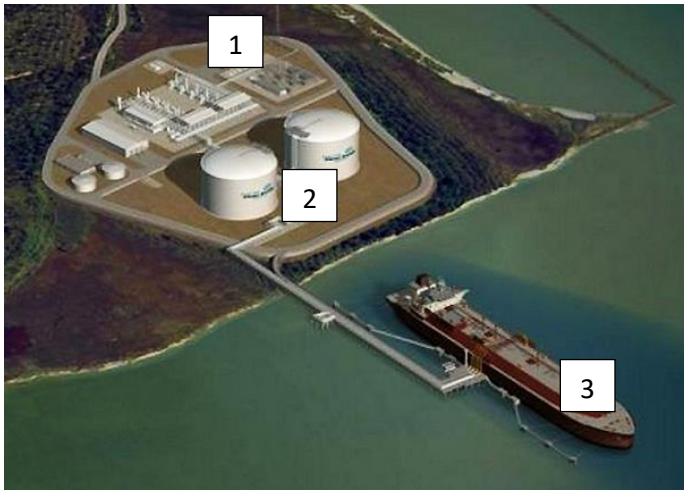
Аннотация
Развитие отрасли производства сжиженного природного газа (СПГ) с каждым годом набирает все большие обороты. По всему миру открываются новые заводы не только малотоннажного, но и крупнотоннажного производства СПГ. В связи с этим перед промышленниками встает ряд вопросов, основными из которых является обеспечение безопасной эксплуатации криогенных трубопроводов. В работе рассмотрены основные особенности использования криогенных трубопроводов для транспорта технологического СПГ в пределах завода и отгрузки СПГ в танкеры. Проанализированы основные виды изоляции для криогенных трубопроводов и преимущества их использования. Сделаны выводы о возможных способах повышения безопасности эксплуатации криогенных трубопроводов на крупнотоннажных заводах СПГ.

Ключевые слова
Сжиженный природный газ, крупнотоннажные хранилища, крупнотоннажные заводы СПГ, крупнотоннажное производство, криогенный трубопровод, изоляция.

Криогенные трубопроводы для подачи сжиженного природного газа являются неотъемлемой частью любого производства СПГ. Особо важное значение имеют трубопроводы при крупнотоннажном производстве сжиженного газа, предназначенного для экспорта. Единственным рациональным средством экспортных поставок является транспортирование СПГ морским транспортом. Для этого производятся специализированные суда – газовозы, которые в настоящее время являются вторыми в мире судами по размерам и по водоизмещению, после авианосцев. Столь крупные суда по определению не могут близко подойти к берегу, поэтому неотъемлемой частью заводов по производству СПГ является заправочный терминал, который позволяет подвести готовый продукт к газовозу, расположенному на расстоянии от 1 до 3 км от ёмкости, в которой накапливается производимый СПГ.

Рынок СПГ в России слабо развит: в стране действует только один завод по сжижению газа в рамках проекта «Сахалин-2», контролируемого «Газпромом». Завод был запущен 18 февраля 2009 года. По результатам работы в 2010 году завод по производству СПГ вышел на проектную производственную мощность – 9,6 млн т СПГ (что эквивалентно 13 млрд м³ газообразного природного газа). В концерне намерены построить дополнительные СПГ-заводы во Владивостоке (мощность завода составит не менее 10 млн тонн СПГ в год), а также «Балтийский СПГ» в Ленинградской области. Оба эти предприятия планируется завершить к 2018 году [1].

Понять структуру производящих СПГ заводов можно на примере схемы завода, строительство которого предполагается в порту Усть-Луга Ленинградской области. Схема данного объекта представлена на рис. 1.



1 – ожижительный комплекс; 2 – цистерны; 3 – место заправки танкера
Рис. 1. Схема объектов завода СПГ соединенных криогенными трубопроводами

Основой завода СПГ является ожижительный комплекс (1), который превращает газообразный газ, поступивший по трубопроводу, в жидкость. При этом объем с энергоносителя уменьшается в 600 раз что позволяет достаточно компактно размещать на судах большое количество сжиженного газа.

По соображениям безопасности газ, производимый на ожижительном блоке (1) накапливается в цистернах (2), которые удалены от блока ожижения на расстояние не менее 100 м. Потребность в накопительных ёмкостях связана с тем, что отгрузка жидкости в танкера осуществляется дискретно. И для того, чтобы загрузить танкер объемом до 200 тыс. м. куб. заводу СПГ с производительностью 10 млн. т. в год необходимо работать примерно 3е суток. Танкер СПГ не может простаивать под загрузкой длительное время, так как это стоит очень дорого из-за больших затрат на строительство фрахт таких судов.

Поэтому была предпринята следующая схема: непрерывно производимый СПГ накапливается в 2-4 хранилищах, из которых потом на сутки заправляется пришедший танкер. Одновременно с выдачей жидкости из емкости хранения производится их накопление, поэтому в один танкер размещается 4х суточная выработка завода СПГ с производительностью 10 млн.т. в год.

Как видно из рис. 1, расстояние между накопительными емкостями (2) и точкой заправки танкеров (3) достаточно велико. При этом, несмотря на большое расстояния при транспортировании СПГ, нельзя использовать традиционные для криогенной и воздухоразделительной техники приемы. Такие как: использование повышенных давлений, предварительное переохлаждение жидкости в накопительной емкости и т.д. Эти ограничения имеют под собой несколько физических причин.

Во-первых, СПГ хранится в емкостях (2) при давлении близком к атмосферному. Размеры емкостей очень велики, поэтому поддержание внутри них даже небольшого давления потребовало бы значительного усложнения конструкции и увеличения толщины отдельных конструктивных элементов. Наиболее «слабым», с точки зрения прочностных характеристик, узлом емкости (2) является купол цистерны, который в отдельных случаях имеет диаметр более 50 м. Поэтому давление внутри криогенных емкостей (2) всегда незначительно превышает атмосферное.

Во-вторых, нельзя охлаждать СПГ в цистернах (2). Так как в этом случае давление паров над зеркалом жидкости будет ниже атмосферного и крыша цистерны (2) вместо нагрузки от внутреннего давления будет испытывать нагрузку от атмосферного давления пропорционально разности давлений. При этом прочностные характеристики оболочек еще хуже.

Если сделать цистерну (2) негерметичной, то при падении давления насыщенных паров над зеркалом жидкости в емкость будет проникать атмосферный воздух, что может привести к образованию взрывоопасных концентраций. Что также недопустимо. Таким образом, исходное давление жидкости в емкости (2) всегда невелико

Еще одним фактором, из-за которого нельзя повышать давление жидкости в накопительных емкостях (2) является то, что жидкость хранится в танкерах также при атмосферном давлении, поэтому на мембранное хранилище танкеров распространяются те же ограничения, что и на стационарную емкость. Таким образом, подача жидкости может идти: а) с малыми скоростями; б) с небольшим перепадом давления. Для наглядности представления в работе рассмотрены два проекта, реализуемые на территории Ленинградской области.

Принципиальное отличие между простыми трубопроводами и трубопроводами, транспортирующими СПГ, состоит в решении ими принципиально разных задач.

Основными проблемами обеспечения надежности и безопасности при транспортировке СПГ по криогенным трубопроводам являются:

1. Отдаленность причалов отгрузки СПГ от берега и, как правило, соединяют с береговыми сооружениями переходным мостом или эстакадой.
2. Значительная протяженность на крупнотоннажных заводов СПГ криогенных трубопроводов, осуществляющих транспортировку СПГ между резервуаром для хранения СПГ и причалом отгрузки продукта на танкер, (от сотен метров до десяти километров). Это связано с оптимизацией размещения крупнотоннажных резервуаров объемом 120–160 тыс. м^3 и размещением причалов [2].
3. Значительный диаметр криогенных трубопроводов (400–1000 мм), а следовательно, при значительных протяженностях и диаметрах криогенных трубопроводов СПГ существенно возрастает объем опасных веществ, циркулирующих в системе, соответственно, повышается пожаро- и взрывоопасность.

Эксплуатация криогенных трубопроводов СПГ производится в двух режимах: хранения и отгрузки [3]. В режиме хранения СПГ поступает из резервуаров, циркулирует по трубопроводной эстакаде, коллекторам причала погрузки и возвращается в резервуары. Циркуляция необходима для поддержания системы трубопроводов в криогенном состоянии. В режиме отгрузки осуществляется перекачка СПГ из резервуаров на танкер. Погружные насосы создают необходимое давление нагнетания порядка 0,7–1 МПа. Скорость отгрузки СПГ из резервуаров хранения на танкеры составляет в среднем 12 000–14 000 м^3/ч.

Перед началом отгрузки при полном расходе судовые танки СПГ должны быть охлаждены до температуры ниже –100 °С. При загрузке танкеров откачку СПГ проводят одновременно несколькими насосами из всех имеющихся резервуаров.

Главная особенность эксплуатации криогенных трубопроводов СПГ – зависимость транспортируемой среды от характера изменения давления и температуры по длине трубопровода. При падении давления в трубопроводе ниже давления насыщения сжиженного газа при данной температуре, жидкость начинает кипеть и образуется паровая фаза, заполняющая часть сечения трубопровода [4].

В этих целях внешний контур криогенных трубопроводов СПГ снабжают Значительная протяженность криогенных трубопроводов СПГ требует сохранения теплового баланса. В настоящее время используют криогенные трубопроводы с газозаполненной изоляцией, образующейся из сыпучих, волокнистых или вспененных

материалов при атмосферном давлении или вакуумной изоляцией, которая может иметь специфические варианты реализации, такие как порошковая, экрано-вакуумная или высоковакуумная.

Схема конструкции таких трубопроводов представлена на рис. 2.

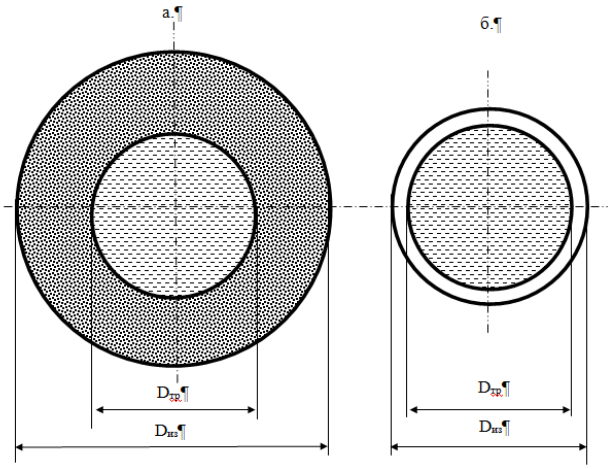


Рис. 2. Схема СПГ трубопровода: а. с газозаполненной изоляцией;
б. с вакуумной изоляцией

В независимости от выбора типа изоляции внутренний диаметр трубопровода будет определяться емкостью танкера-газовоза, максимально допустимым временем его заправки и выбором скорости движения СПГ по трубопроводу. Для проведения анализа стоит утверждать, что и в случае вакуумной, и в случае газозаполненной изоляции внутренний диметр трубопровода будет одинаковый. Существенно будут разниться внешние диаметры кожухов изоляции, которые необходимо изготавливать в обоих случаях. В случае газозаполненной изоляции – для защиты наполнителя от негативного воздействия атмосферного воздуха и влаги, а в случае выкуумной изоляции – для формирования вокруг трубы с транспортируемым СПГ вакуумного пространства. Заполнение низкотемпературных трубопроводов представляет собой сложный нестационарный процесс с возможностью появления таких опасных факторов, как гидравлический удар, гейзерные эффекты [5]. При отгрузке СПГ также существует вероятность гидроудара в результате аварийного (в течение 2–3 с) разъединения загрузочных рукавов причала и приемных коллекторов танкера.

Накопление электростатического заряда, возникающего при транспортировке СПГ на поверхности трубопроводов, может привести к возникновению электрических разрядов [4]. Накопленный заряд в случае разгерметизации трубопровода существенно повышает риск возникновения взрыва или пожара газовоздушной смеси.

Эксплуатация трубопроводов СПГ при низких температурах (до –165°С) приводит к появлению таких неблагоприятных явлений, как температурные деформации, возникновение и распространения трещин в трубе. Для трубопроводов необходимо использовать специальные стали, обеспечивающие прочность и пластичность труб.

В качестве основной внутренней опасности криогенных трубопроводов прежде всего рассматривают сценарий разгерметизации соединений с оборудованием. При этом большую опасность во время эксплуатации представляет разгерметизация трубопровода, обычно в местах установки запорной арматуры [5].

Таким образом, особенности эксплуатации криогенных трубопроводов СПГ требуют решения ряда вопросов по обеспечению безопасности и надежности, учитывающих специфику отгрузки СПГ на танкеры [5]: расчеты нагрузок и воздействий на трубопроводы СПГ, учитывающие особенности (протяженность) транспортировки СПГ для отгрузки на танкер, в том числе обеспечение надежности

трубопровода при нестационарных режимах перекачки, связанных с аварийным отсоединением танкера; обнаружение утечек и (или) загазованности на теплоизолированных трубопроводах СПГ большой протяженности, в том числе и в арктических условиях; предотвращение эскалации аварии при разгерметизации одного из трубопроводов, проложенных на трубопроводной эстакаде; требования к минимальным безопасным расстояниям до возможных объектов сближения по трассе трубопровода; функционирование единой системы противоаварийной защиты «танкер – берег» при загрузке танкера и др.

Литература

1. Рогачев М.Ю. Непрофильный газ // Эксперт Северо-Запад. 2011. №16 (324).
2. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. – 159 с.
3. Лесконог А.А., Чуркин Г.Ю. Особенности и основные проблемы обеспечения промышленной безопасности терминалов сжиженного природного газа// Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 12. – С. 57–61.
4. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. – М.: Изд-во «НЕФТЬ и ГАЗ», 2009. – 640 с.
5. Чуркин Г.Ю., Синицина А.А., Базалий Р.В. Опыт и проблемы разработки специальных технических условий для объектов газотранспортной системы// Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 4. – С. 66–70.

СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

УДК 621.515.4, 621.514.52

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВКО

В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, А.В. Божедомов, А.А. Семенов, А.Ф. Миникаев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

diana.zhignovskaya@gmail.com

Аннотация
Актуальность применения аддитивных технологий для созданий рабочих органов ВКО на этапе конструирования и изготовления. Оптимизация зазоров при зацеплении зубьев отсекателя с центральным винтом, уменьшение величины протечек компримируемой среды в минимальных допустимых зазорах. Разработка методики 3D-моделирования профиля канавки ротора и контура зуба отсекателя ВКО посредством расчета координат их поверхностей с использованием языка java-программирования и системы проектирования САПР «КОМПАС-3D. Разработанная методика моделирования рабочих органов ВКО позволяет изготовить отсекатель с окружной формой зуба, полностью повторяющей профиль канавки ротора, тем самым существенно улучшить энергетические и объемные характеристики изготавливаемого одновинтового компрессора. Обзор антифрикционных композиционных материалов и их разновидностей, анализ недостатков и преимуществ материалов на российском рынке и их перспективы дальнейшего внедрения. Представлены сравнительные характеристики рассматриваемых материалов: прочностных характеристики, коэффициент теплового расширения, коэффициент трения, твёрдость и цена. Дальнейшие перспективные пути развития производства компрессорного оборудования в Российской Федерации.

Ключевые слова
Холодильная техника, газодинамика, винтовой одновинтовой компрессор, зуб отсекателя окружного профиля, 3D-моделирование, композиционные материалы.

На сегодняшний день трехмерное компьютерное моделирование является одним из современных способов получения объёмной графики, без которого сложно представить любую сферу промышленности на этапе конструирования элементов машины или её более значимых деталей. На этапах разработки или проектирования любого продукта для получения достоверных значений необходимо получить многогранный макет, который представляет собой многовекторный чертеж с номинальными размерами и визуальным представлением готовой работы.

Настоящая работа посвящена разработке методики 3D-моделирования профиля канавки ротора и контура зуба отсекателя ВКО (рис. 1) посредством расчета координат их поверхностей [1, 2, 3] с использованием языка java-программирования и системы проектирования САПР «КОМПАС-3D» с последующей печатью рабочих органов компрессора на 3D-принтере с управлением на производственной базе АО НПО «Компрессор». Это позволит упростить технологию изготовления рабочих органов

ВКО и удешевить производство с помощью применения новых неметаллических материалов, обладающих антифрикционными свойствами.

Научная новизна данной работы заключается в том, что ВКО, изготовленный на базе разработанной технологии 3D-моделирования, позволит максимально уменьшить величину зазоров между полостями рабочих органов и повысить газодинамические характеристики разрабатываемой модели ВКО. ВКО представляет собой машину объемного сжатия, состоящую из центрального винт и отсекающих устройств, помещенных в единый корпус. Нагнетание давления происходит за счет уменьшения объема компримируемой среды в замкнутой полости, ограниченной рабочими органами, находящимися в зацеплении [4, 5].

Проектирование рабочих органов ВКО с использованием технологий 3D-моделирования необходимо для оптимизации зазоров при зацеплении зубьев отсекателя с ротором, что позволит уменьшить величину протечек компримируемой среды в узких зазорах при зацеплении рабочих органов ВКО, тем самым повысить его энергетические и объемные показатели.

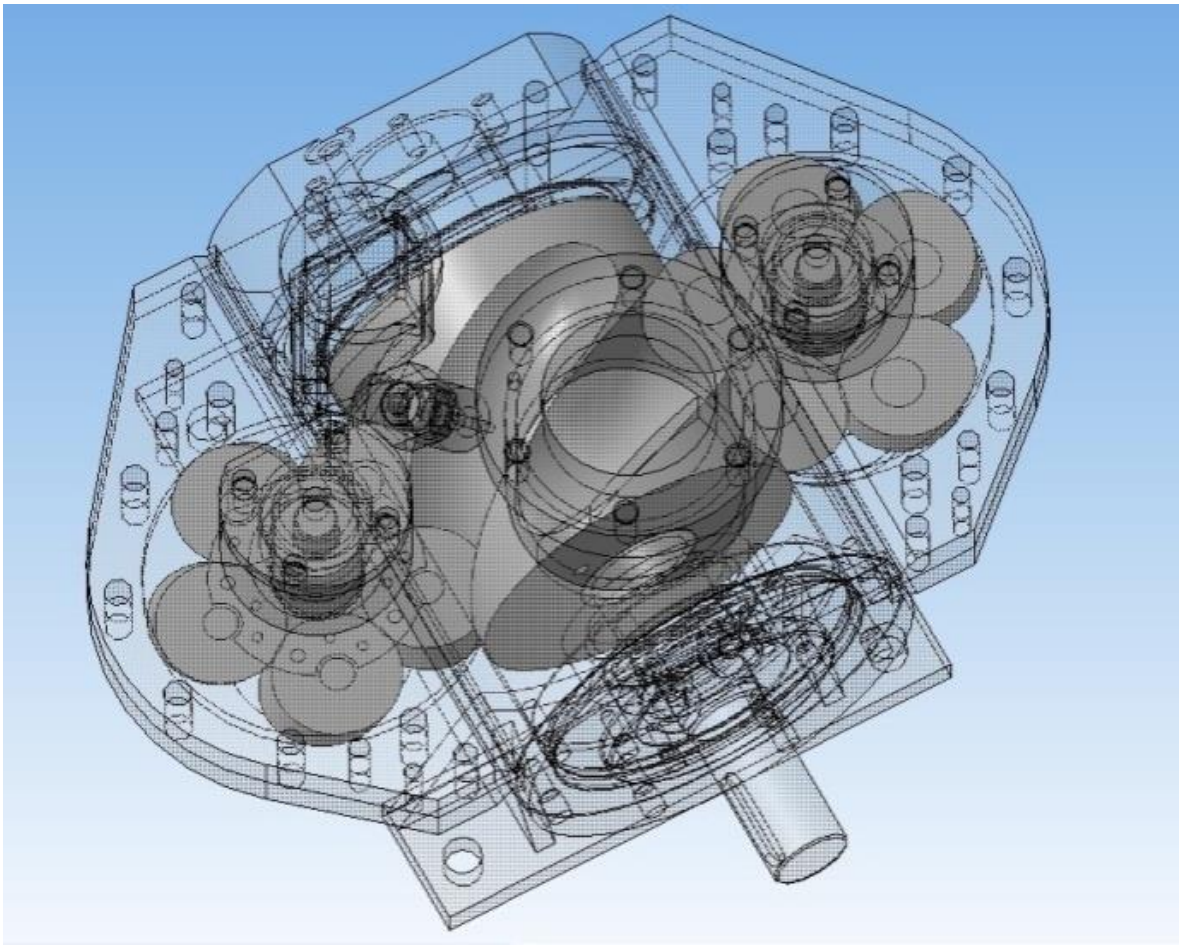


Рис. 1. ВКО с окружным профилем зуба отсекателя

Разработка методики 3D-моделирования обусловлена тем, что анализ литературных источников не показал обобщенной технологии проектирования рабочих органов ВКО с окружным профилем зуба отсекателя, пригодной для непосредственного изготовления на производстве. Рассмотренная нами методика [6, 7, 8] сводится к определению местоположения взаимоспоряженных точек ротора и отсекателя в каждый отрезок времени с момента их входа в зацепление (рис. 2).

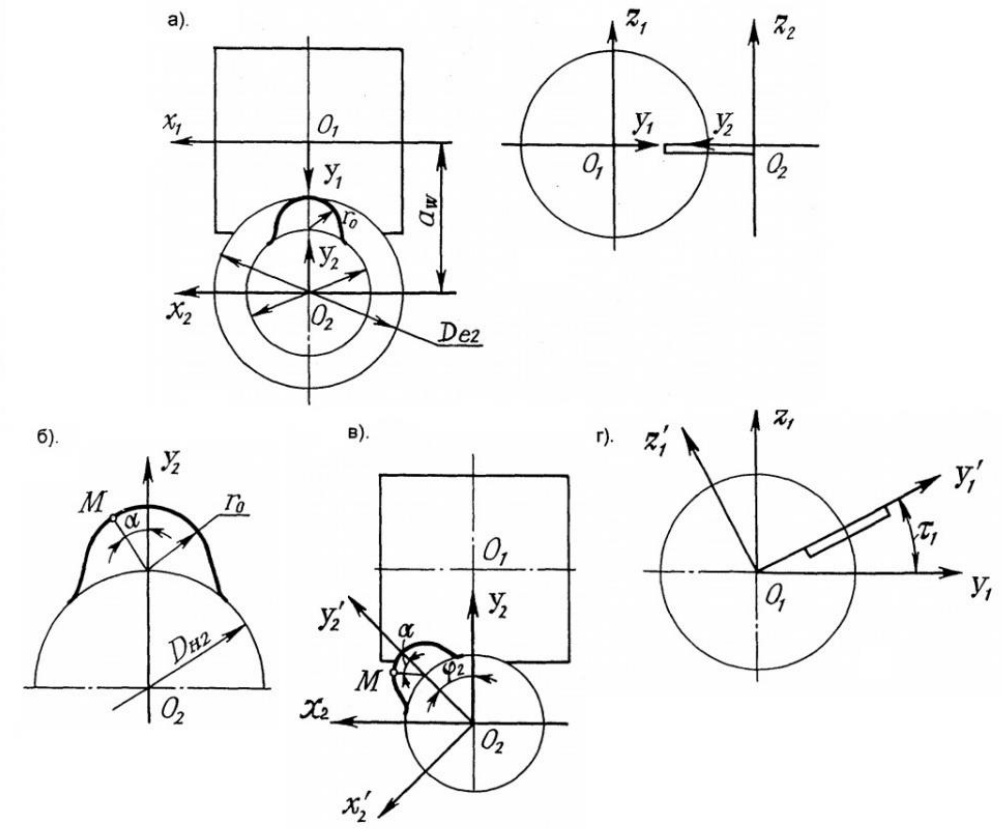


Рис. 2. Взаимное расположение рабочих органов ВКО

Российская Федерация не входит в состав производителей современного компрессорного оборудования на базе ВКО, что существенно снижает темпы экономического и промышленного развития государства в данном направлении, что делает задачу, поставленную в данном исследовании актуальной в плане импортозамещения.

Выбор материала для поставленных целей осуществляется исходя из следующих параметров: прочностных характеристик, коэффициента теплового расширения, коэффициента трения, твёрдости и цены. Исходным материалом зуба отсекателя, который находится в паре центральным винтом, является бронза оловянная литейная. Бронза как антифрикционный материал в паре со сталью (центральный винт) позволяет продлить срок службы детали. Поэтому нами был проведен анализ и подбор новых неметаллических антифрикционных композиционных материалов на российском рынке для последующей печати на 3D-принтере рабочих органов ВКО с учётом разработанной методики 3D-моделирования профиля канавки ротора и контура зуба отсекателя [9,10].

Рассмотренные нами материалы ZEDEX-100K, ФТОРОПЛАСТ-4, U3 NYLON SUPER CARBON, KEPITAL TX-31, POM-C пригодны для 3D-печати и изготовления подшипников, зубчатых колес, поршневых колёс, следовательно могут быть применимы и для рабочих органов ВКО (рис. 3). Далее были рассчитаны максимальные прогибы зуба отсекателя при сосредоточенной нагрузке и разных перепадах давления нагнетания и всасывания, исходя из модуля упругости материала и прочности на изгиб, где толщина зуба отсекателя принимается постоянной 10 мм из конструктивных условий.

Но наиболее лучшие результаты в сравнении с исходным материалом (БрО10Ф1), где прогиб не так сильно увеличивается при перепадах давления, у материалов KEPITAL TX-31, POM-C, ZEDEX-100K. Так же при проектировании

машины и назначении минимальных допустимых зазоров важную имеет коэффициент теплового расширения это связано с рядом механических и тепловых деформаций [11].

Дальнейшие пути развития ВКО состоят в использования уже имеющихся резервов:

1. Уменьшения стоимости изготовления за счёт модернизации технологий изготовления рабочих органов;
2. Упрощение конструкции ВКО и совершенствования технологии изготовления и сборки элементов конструкции машины;
3. Решение оптимизационной задачи по выбору параметров рабочих органов винтового одноротороного компрессора;
4. Применения новых материалов, обладающих хорошими антифрикционными свойствами в зубчатых отсекателях ВКО.

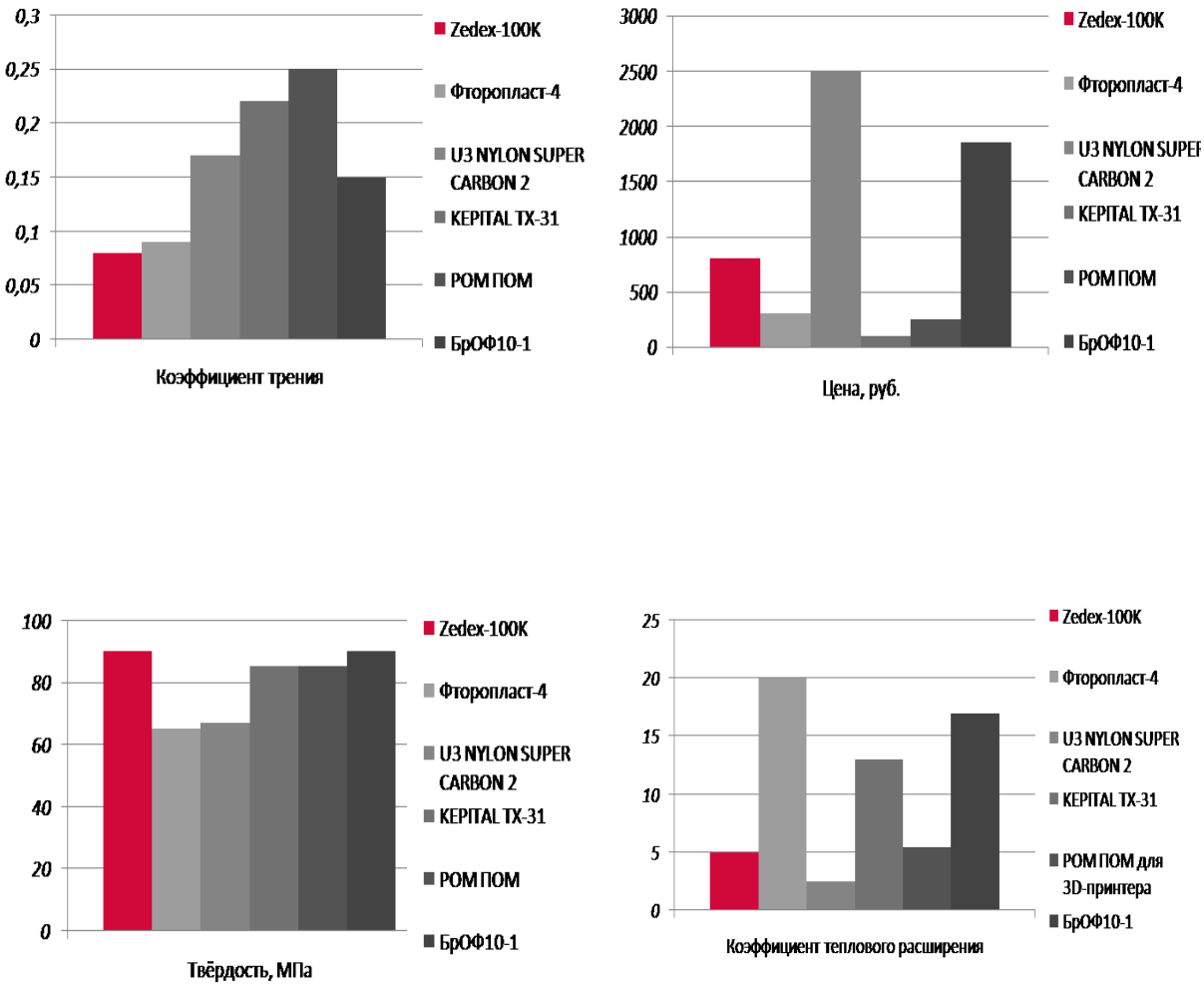


Рис. 3. Сравнительные характеристики рассматриваемых материалов

В ближайшее время на АО НПО «Компрессор» планируется сборка и испытание ВКО с использованием зубьев отсекателя, выполненных в виде винтового столба [12]. Однако данный вид зубьев не позволяет получить согласованное зацепление без увеличения зазоров между рабочими органами ВКО. Разработанная методика моделирования рабочих органов ВКО позволяет изготовить отсекатель с окружной формой зуба, полностью повторяющей профиль канавки ротора, тем самым существенно улучшить энергетические и объемные характеристики изготавливаемого одноротороного компрессора [13]. Теоретические и экспериментальные наработки, полученные в результате данных исследований, создают большие перспективы для

дальнейшего развития и производства компрессорного оборудования в Российской Федерации.

Литература

1. Сакун И.А. Винтовые компрессоры: Основы теории, методы расчета, конструкции. – Л.: Машиностроение,1970. – 400 с.
2. Пронин В.А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики [Текст]: дис. докт. тех. наук. / Пронин Владимир Александрович – СПб.,1998, 226с.
3. Zimmern B. Worm rotary compressors with liquid joints. U.S. Patent No. 3133695; 1965.
4. Миникаев А.Ф., Ережеп Д. Сравнительные характеристики двухроторных и однороторных компрессоров // Сборниктезисов докладов V Всероссийского конгресса молодыхученых. – СПб.: Университет ИТМО, 2016, С. 1.
5. Пронин В.А., Миникаев А. Ф., Долговская О. В. К вопросу протечек компримируемой среды в рабочей части однороторного винтового компрессора (ВКО) с окружной формойзуба// Вестник Международной академии холода. 2016.№ 3, С. 43 – 46.
6. Пронин В.А., Миникаев А.Ф., Крапивко П.В. Применение аддитивных технологий для оптимизации зазоров рабочих органах винтовых однороторных компрессоров // Материалы конференции VIII Международная научно-техническая конференция «Низко-температурные и пищевые технологии в XXI веке». – СПб.: Университет ИТМО, 2017. С. 168 – 168.
7. Pronin V.A., Kuznetsov Y.L., Zhignovskaia D.V. Features of designing screw compressors for the oil and gas industry//AIP Conference Proceedings, IET – 2018, Vol. 2007, pp. 030017.
8. Пронин В.А., Миникаев А.Ф., Жигновская Д.В., Кузнецов Ю.Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода –2018. – № 1(66). – С. 61-66.
9. Pronin V.A., Malyshev A.A., Dolgovskaia O.V. Calculation of Leakages of Compressed Media in Screw Compressors//Chemical and Petroleum Engineering, IET – 2018, Vol. 54, No. 3-4, pp. 183-187.
10. Minikaev A., Yerezhep D., Pronin V.A. Using Computer Modeling Methods to Develop the Screw Single-Rotary Compressor Working Bodies Profiles//2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IET – 2018, pp. 8501830.
11. Пронин В.А., Миникаев А.Ф., Миникаева Н.В., Крапивко П.В., Жигновская Д.В. К вопросу оптимизации рабочих органов ВКО//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО – 2018.
12. Пронин В.А., Жигновская Д.В., Миникаева Н.В. К вопросу оптимальной толщины зуба отсекателя винтового однороторного компрессора//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО – 2018.
13. Пронин В.А., Жигновская Д.В. Исследование антифрикционных композиционных материалов для рабочих органов винтовых//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО – 2019.

УДК 697.94

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПАРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Н.Ю. Филькин, В.Л. Юша

ОМГТУ, г. Омск, Россия

finick@inbox.ru

Аннотация
В работе рассмотрено повышение эффективности газового адсорбционного фильтра с коротким диффузором путем воздействия на его проточную часть. Проанализированы различные технические решения с точки зрения критериев газодинамической эффективности и эффективной степени очистки. Проведены численные и экспериментальные исследования, показавшие эффективность применения неравномерных концентрических направляющих и профилирования слоя адсорбционного материала.

Ключевые слова
Газовый фильтр, короткий диффузор, проточная часть, профиль поля скоростей, аэродинамическое сопротивление

Адсорбционные газовые фильтры применяются в системах жизнеобеспечения для очистки воздуха вредных примесей, в том числе и от паров углеводородов. Анализ работы таких фильтров показал, что их эффективность очистки сильно зависит от скорости потока, поступающего в проточную часть фильтра. При этом максимальная эффективность достигается при скорости потока, равной расчетной скорости, то есть такой, которая обеспечивает требуемое время взаимодействия между адсорбентом и воздушным потоком, содержащим вредные примеси. Соответственно, отклонение скорости потока от расчетной в большую или меньшую сторону может привести к ухудшению эффективности очистки воздуха адсорбционными фильтрами [1].

Если рассматривать работу адсорбционных фильтров с точки зрения критериев газодинамической эффективности (аэродинамическое сопротивление и неравномерность поля скоростей) [2], то можно отметить, что наибольшее влияние на эффективность очистки воздуха оказывает второй критерий. Связано это с тем, что в проточной части традиционных конструкций фильтров с коротким диффузором (рис. 1, а) имеет место значительная неравномерность поля скоростей, которая приводит к росту локальных скоростей потока перед фильтрующим элементом [3]. Необходимость обеспечить эффективную работу фильтра с учетом локальных скоростей, значительно превышающих среднюю скорость потока, может потребовать увеличения толщины слоя адсорбента, что приводит к росту массогабаритных параметров и стоимости фильтров, а также аэродинамического сопротивления.

Для устранения неравномерности поля скоростей в проточной части газовых фильтров с коротким диффузором могут устанавливаться сопротивления в виде следующих элементов [4]:

- Разделительные стенки (направляющие) (рис. 1, б);
- Неполные перфорированные пластины (рис. 1, в);

- Плоская сетка, решетка или другое сопротивление, равномерно распределенное по сечению (рис. 1, г).

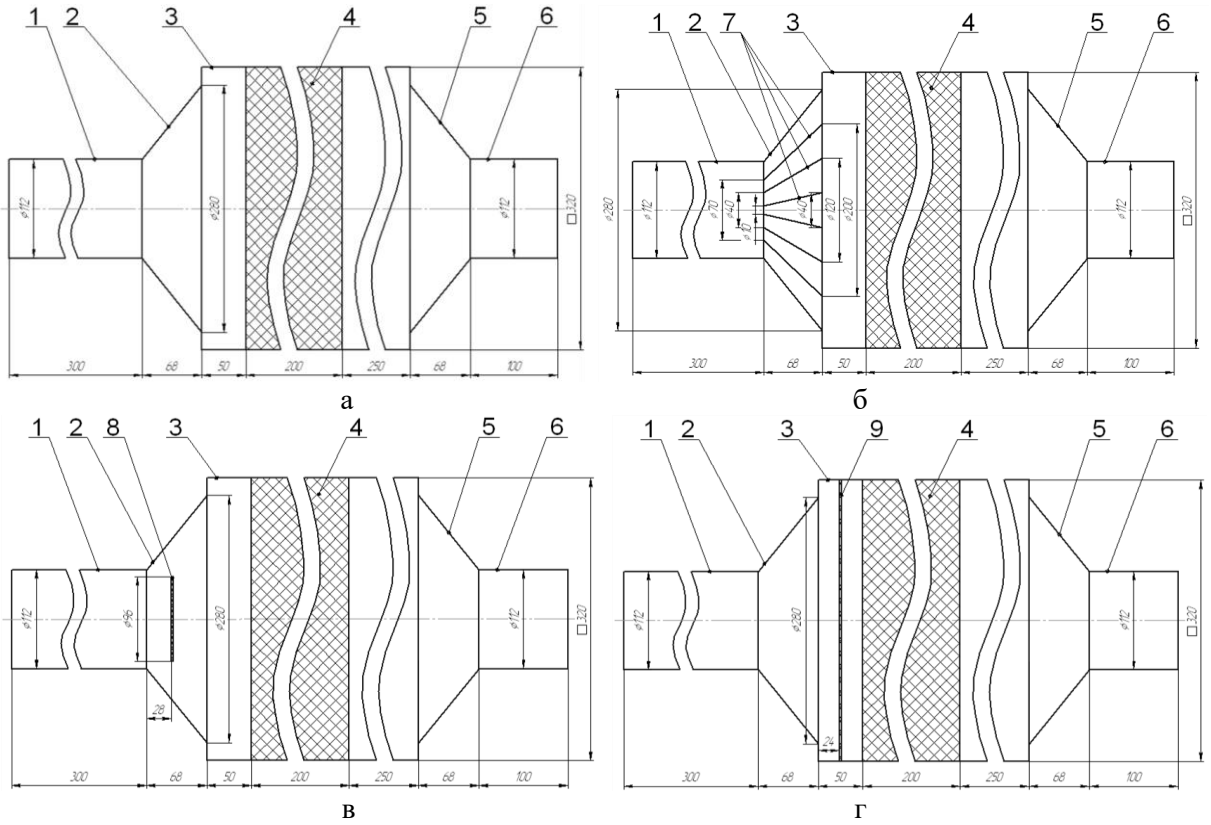


Рис. 1. Варианты проточной части газового фильтра с коротким диффузором:
а – базовая конструкция; б – с неравномерно установленными концентрическими направляющими; в – с неполной перфорированной пластиной; г – с решеткой;
1 – входной воздуховод; 2 – короткий диффузор; 3 – корпус; 4 – фильтрующий элемент; 5 – конфузор; 6 – выходной воздуховод; 7 – концентрические направляющие; 8 – неполная перфорированная пластина; 9 – решетка

Для оценки эффективности предложенных решений по сравнению с базовой конструкцией в программе ANSYS CFX были проведены численные газодинамические исследования [5]. При этом размеры неравномерно установленных концентрических направляющих была определены с помощью инженерной методики, изложенной в [6], а размеры неполной перфорированной пластины и решетки – исходя из рекомендаций, изложенных в [4]. По результатам расчетов для каждого варианта строился профиль поля скоростей в сечении, находящимся перед фильтрующим элементом на расстоянии 10 мм от него, а также рассчитывалось аэродинамическое сопротивление проточной части всего газового фильтра в целом.

Анализ полученных результатов показал, что для всех вариантом значения локальных скоростей имеют тенденцию к уменьшению по сравнению со средней скоростью потока V_a, что объясняется как увеличением площади поперечного сечения проточной части, так и влиянием на поток неподвижных элементов (направляющие, пластина, решетка). В то же время, визуально оценивая профили поля скоростей, можно сделать вывод, что наилучшая равномерность достигается при установке неравномерных концентрических направляющих. Расчет аэродинамического сопротивления показал, что применение решетки и пластины приводит к его значительному повышению (до 52%), а использование направляющих снижает сопротивление на величину до 48%.

Таким образом, наиболее эффективным из предложенных решений с точки зрения критериев газодинамической эффективности является установка неравномерных концентрических направляющих. Однако остается открытым вопрос о влиянии направляющих на эффективность очистки воздуха адсорбционными материалами. В целях решения данного вопроса были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования были проведены для двух вариантов: для базового исполнения (рис. 1, а) и для варианта с неравномерными концентрическими направляющими (рис. 1, б). При этом в проточной части каждого из вариантов устанавливалась кассета с адсорбентом, представляющим собой композитный материал – сульфат меди, нанесенный на углеродный носитель «Сибунит». Содержание сульфата меди – 5 мас. %.

В начале эксперимента толщина слоя адсорбента в кассете составляла 200 мм. В ходе исследования в газовый фильтр подавался поток воздуха со средней скоростью V_a = 1 м/с с примесями паров бензина с концентраций 300 мг/м^3. После измерения концентрации примесей в воздухе газоанализатором до и после фильтра толщина слоя уменьшалась на 5 мм, и испытания повторялись при тех же параметрах потока.

Анализ полученных результатов показал, что допустимая толщина слоя адсорбента газового фильтра с коротким диффузором с неравномерными концентрическими направляющими должна составлять не менее 85 мм, а для базовой конструкции без направляющих – не менее 110 мм. Таким образом, экономия материала при применении неравномерных концентрических направляющих может достигать 23%.

Однако, несмотря на положительный эффект от установки неравномерных концентрических направляющих, их применение может со временем привести к росту аэродинамического сопротивления в ходе эксплуатации газовых фильтров при осаждении некоторых загрязняющих воздух веществ на стенках направляющих. Осаждение загрязняющих частиц вызовет сужение радиальных зазоров между направляющими, что приведет к повышению местной скорости потока, а также перестроению профиля поля скоростей перед фильтрующим элементом, ухудшив работу последнего.

Одним из возможных путей решения данной проблемы, т.е. при невозможности или затруднении применения направляющих, является профилирование слоя адсорбционной насыпки фильтра исходя из профиля поля скоростей в выходном сечении короткого диффузора перед этим слоем. С точки зрения выравнивания скоростей по сечению применение слоя переменной толщины, а, следовательно, переменного сопротивления вполне оправдано [4]. Однако подтверждение целесообразности и эффективности данного решения требует проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проходили в два этапа.

В ходе проведения первого этапа для последующего профилирования слоя адсорбента было необходимо получить зависимость между толщиной слоя, обеспечивающей эффективную очистку, и средней скоростью потока. При этом эффективной считалась очистка со степенью не менее 92%, т.е. концентрация паров бензина на выходе из фильтра не должна была превышать 32 мг/м^3. Толщина слоя адсорбента определялась методом подбора путем последовательного уменьшения с 200 мм на 5 мм для каждого значения средней скорости потока. В результате была получена зависимость эффективной толщины слоя адсорбента от средней скорости потока.

Так как эффективная толщина слоя привязана к средней скорости потока V_a, а не к мгновенной скорости V_i в выходном сечении диффузора, то необходимо для каждого значения средней скорости построить профиль поля скоростей в выходном сечении диффузора и связать этот профиль с толщиной слоя через относительную скорость

$V'_{imax} = V_{imax}/V_a$, где V'_{imax} – максимальная мгновенная скорость в выходном сечении диффузора, однозначно определяющая толщину слоя адсорбента.

Результаты построения профилей позволили отметить, что при увеличении средней скорости потока характер профиля не меняется, но в то же время происходить его удлинение, которое пропорционально росту средней скорости потока. При этом относительная скорость V'_{imax} сохраняет почти постоянное значение ($V'_{imax} \approx 0{,}61$), отклоняясь не более чем на 5 %. Поэтому было принято решение на основании этих данных построить зависимость $\delta = f(V_{imax})$, где δ – толщина слоя адсорбента, и эту зависимость использовать для расчета местной толщины слоя адсорбента. При этом, так как при средней скорости $V_a < 10$ м/с значения мгновенной скорости V_{imax} будут уменьшаться, то толщины слоя адсорбента, найденной при $V_a = 10$ м/с, будет достаточно для необходимой очистки воздуха от паров бензина в диапазоне $V_a = 2…10$ м/с.

Используя полученные данные, было выполнено профилирование слоя адсорбента. При этом профилировалась передняя сторона слоя, тогда как задняя сторона оставалась плоской. Получение требуемого профиля слоя адсорбента достигалось его насыпкой в кассету, представляющую собой металлический каркас с передней и задней стенкой из фильтровальной мелкоячеистой сетки. Передняя стенка кассеты была отформована согласно профилю, а задняя стенка выполнена плоской. На рис. 2 представлена схема газового фильтра с профилированной насыпкой.

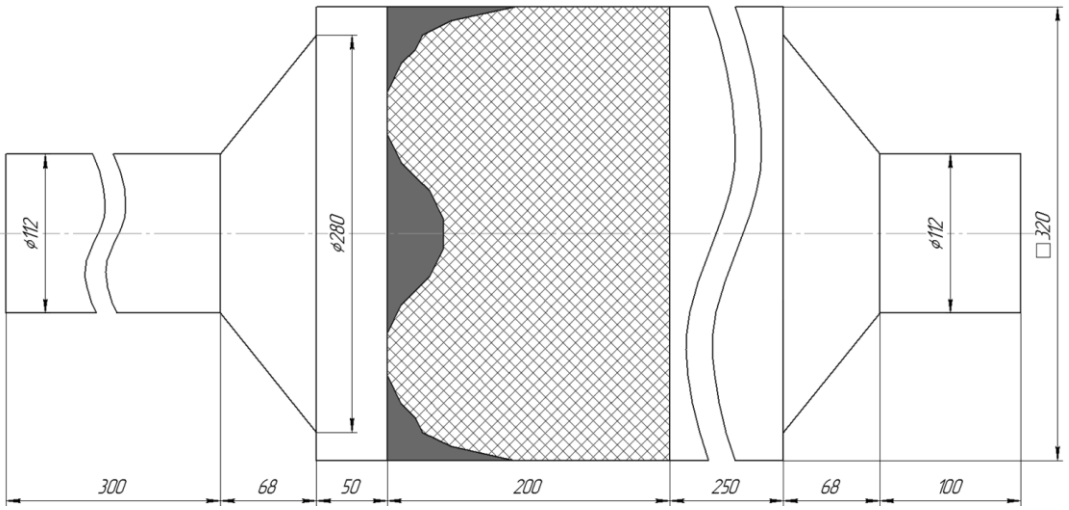


Рис. 2. Схема газового фильтра с профилированной насыпкой. Закрашенная область – выигрыш по объему насыпки по сравнению с непрофилированным вариантом

На втором этапе экспериментальных исследований были проведены испытания газового фильтра с установленной в его корпус профилированной кассетой с адсорбентом. Целью проведения второго этапа было определение степени очистки и аэродинамического сопротивления газового фильтра при средней скорости потока, лежащей в диапазоне от 2 до 10 м/с. По результатам испытаний было выявлено, что степень очистки воздуха от паров бензина удовлетворяет заданным требованиям и превышает пороговое значение в 92% во всем исследуемом диапазоне средней скорости потока. В то же время было достигнуто снижение аэродинамического сопротивления фильтра по сравнению с базовой конструкцией фильтра (рис. 1, а) на величину до 26%.

По результатам численных и экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

- Применительно к адсорбционным газовым фильтрам с коротким диффузором критериями газодинамической эффективности является как минимальное аэродинамическое сопротивление фильтра в целом, так и равномерность поля скоростей потока в проточной части фильтра;
- Установка в проточной части фильтра с коротким диффузором неравномерных концентрических направляющих позволяет повысить эффективность фильтра с точки зрения критериев газодинамической эффективности, а также с позиции сохранения эффективности очистки при меньшем на 23% объеме насыпки адсорбента;
- В случае невозможности или затруднении применения направляющих или других специальных элементов в проточной части фильтра выходом может стать профилирование слоя адсорбционной насыпки фильтра исходя из профиля поля скоростей в выходном сечении короткого диффузора перед этим слоем;
- Установка профилированной кассеты в проточной части газового фильтра позволяет снизить объем насыпки адсорбента на 17,6% (с 20,5 до 16,9 л.). При плотности адсорбционного материала 650 кг/м^3 это дает снижение массы кассеты на 2,34 кг, что, в свою очередь, положительно отразится на массе и стоимости всего изделия в целом. Аэродинамическое сопротивление относительно базовой конструкции при профилировании снижается на величину до 26%.

Таким образом, применение короткого диффузора с неравномерными концентрическими направляющими позволяет уменьшить требуемую толщину слоя адсорбционного материала относительно базового варианта без направляющих, тем самым снижая объем дорогостоящих материалов в газовых фильтрах при сохранении требуемой эффективности очистки воздуха от примесей и предельно-допустимой концентрации вредных веществ. В то же время профилирование слоя насыпки адсорбционного материала в газовых фильтрах оправдано с точки зрения улучшения их характеристик при сохранении эффективной работоспособности конструкции, особенно в тех случаях, когда другие варианты не могут быть применены. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации газовых фильтров систем жизнеобеспечения стационарных и мобильных объектов.

Литература

1. Анализ термических процессов в каталитических фильтрах для улавливания сажи / Т. Л. Павлова и [др.] // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40 – №3. – С. 14-21.
2. Filkin N. Yu. Increase in efficiency of gas filters with a short diffuser when operating in a swirling flow [Electronic resource] / Filkin N.Yu., Yusha V.L., Kapelyukhovskaya A.A. // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2007 : Oil and Gas Engineering (OGE-2018).
3. Yusha V.L. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades [Electronic resource] / V. L. Yusha, N. Yu. Fil'kin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52. – № 7–8. – P 484–487.
4. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / Идельчик И.Е. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
5. Filkin N.Yu. The engineering technique for calculating the design parameters of the guides in the flowing part of gas filters short diffusers [Electronic resource] / Filkin N.Yu., Yusha V.L. // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2007 : Oil and Gas Engineering (OGE-2018).

6. Yusha V.L. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades [Electronic resource] / Yusha V.L., Fil'kin N. Yu. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52. – № 7–8. – P 484–487.

УДК 697.94

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНО ИЗОЛИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

В.А. Пронин, О.В. Долговская

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

major.pronin@mail.ru, ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru

Аннотация
Актуальность совершенствования систем регенерации воздуха для герметично изолированных объектов связана с увеличением их как количественного состава, так и областей применения. Это могут быть космические объекты, различные убежища, подводные аппараты, а также бытовые и технологические модули для экспериментальных условий. В подавляющем большинстве перечисленных объектов наблюдается дефицит энергетических ресурсов, поэтому системы регенерации воздуха должны быть не только функциональными, но и энергоэффективными. Разрабатываемый макет системы регенерации позволит выполнить целый ряд экспериментальных исследований, что в свою очередь позволит выдать конкретные рекомендации разработчикам подобных систем, оценить эффективность выбранных конструктивных и технологических схем, оценить энергопотребление основных элементов системы регенерации воздуха и провести сравнение с уже существующими аналогами.

Ключевые слова
Система регенерации воздуха, скруббер, герметично изолированные объекты, абсорберы, генераторы кислорода, насадочные тела.

Настоящая работа посвящена созданию макетного образца системы регенерации воздуха для объектов, изолированных от внешней среды, с ограниченным энергопотреблением. Для решения поставленной задачи, необходимо решить вопросы связанные с разработкой технических схем и технологических процессов обработки воздуха, обеспечивающих необходимое качество воздушной среды и условий обитаемости. Основными направлениями при проектировании макетного образца являлись процессы поглощения углекислого газа и регенерации кислорада. В соответствии с техническим заданием в качестве проглотителя CO_2 использовался орошаемый абсорбер насадочного типа, а в качестве источника кислорода – генератор, обеспечивающий химическую реакцию пероксида кальция.

Основные технические характеристики макета системы регенерации воздуха представлены в таблице.

Определенные сложности при разработке макетного образца заключались в выборе абсорбента для поглощения углекислого газа. Анализ литературных источников [1 – 9] и предварительные исследования позволили из всего многообразия абсорбентов выбрать три:гидроксид натрия (NaOH), гидроксид лития (LiOH) и суспензия смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$. При этом было выявлено, что приготовление растворов перечисленных абсорбентов возможно на морской воде с соленостью (5÷35)%, при этом соленость не влияет на скорость поглощения и ресурс раствора.

Таблица

Технические характеристики макета регенерации воздуха

№	Характеристики	Параметры
1	Расход газо-воздушной смеси	250÷550 $м^3$/час
2	Расход жидкости орошения	1,2÷2 $м^3$/час
3	Удельный расход жидкости орошения (интенсивность орошения)	8÷20 $м^3/м^2$ час
4	Относительная эффективность поглощения углекислого газа	0,06÷0,15 %
5	Генерация кислорода	5 г/час
6	Удельные энергозатраты на поглощение CO_2	1,9÷2,0 кВт час/$м^3$
7	Поддержание концентрации углекислого газа, не более	0,3 %
8	Поддержание концентрации кислорода в пределах	20,5±1 %

Предварительные лабораторные исследования показали так же, что процесс барботирования углекислым газом растворов NaOH приводит к выпадению Na_2CO_3 в осадок. Такое явление наблюдалось при исходной концентрации NaOH в растворе свыше 10%. При концентрации 5% NaOH в растворе выпадения карбоната натрия не наблюдалось, но при этом раствор незначительно мутнел.

Применение NaOH для поглощения CO_2 имеет ряд недостатков:

– Большой удельный вес реагента, необходимого для поглощения углекислого газа. Например, для поглощения одного моля CO_2 (44 г) потребуется два моля NaOH (80 г). Для сравнения, два моля LiOH, способные поглотить то же самое количество углекислого газа, имеют массу 48 г, что на 40% меньше.

– В процессе поглощения углекислого газа раствором NaOH образуется Na_2CO_3 хорошо растворимый в воде. Поэтому при замене (регенерации) раствора невозможно отделить оставшийся активный компонент от продукта реакции. Таким образом, будет теряться полезное неотработанное вещество NaOH.

В остальном NaOH является приемлемым для применения в скрубберах веществом.

Проведенные эксперименты по барботированию суспензии смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$ показали, что скорость поглощения углекислого газа по сравнению с расворами гидроксида натрия существенно не изменилась. Однако количество поглощенного углекислого газа снизилось на 20-30%.

Кроме того, выявлено, что при применении суспензии смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$ для поглощения углекислого газа возможно залегания взвеси при отсутствии перемешивания, что ввиду очень низкой растворимости $Ca(OH)_2$ и Ca_2CO_3 в воде может привести к засорению трубопроводов и форсунок оросителя, а также образованию наростов в недоступных для перемешивания зонах. Чтобы избежать негативных последствий использования суспензий смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$ необходимо обеспевать постоянное перемешивание суспензии во всей системе орошения.

Добавление к раствору $Ca(OH)_2$, приготовленного на пресной или имтированной морской воде, 1-2% процентов Li_2CO_3 ведет к повышению скорости поглощения углекислого газа в лабораторных условиях.

На основании полученных лабораторных данных суспензия смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$ принципиально может быть использована в качестве поглотителя углекислого газа, но ее применение предъявляет повышенные требования к конструкции системы орошения, насадке и системе замены реагента.

Наиболее эффективным с точки зрения технологичности и способности к поглощению углекислого газа является раствор гидроксида лития LiOH. Технологичность состоит в возможности фильтрации продукта реакции (карбоната

лития, нерастворимого в воде) механическими фильтрами, установленными в системе подачи жидкости орошения. По поглощающей способности раствор гидроксида лития превосходит раствор гидроксида натрия и суспензию смеси CaO_2 и извести $Ca(OH)_2$.

Однако при работе скруббера возможен вынос в атмосферу отсека аэрозоля гидроксида лития, который имеет первый класс опасности для здоровья человека. Поэтому, требуется дополнительная доочистка газо-воздушной смеси перед поступлением ее в атмосферу отсека.

Ограничение по применению гидроксида лития состоит еще в том, что высококонцентрированные растворы запаса этого реагента имеют вид коллоидного раствора и требуют тщательного перемещивания перед подачей реагента. А также создание дополнительной системы разбавления концентрата до концентрации жидкости орошения.

Таким образом, наиболее приемлемым абсорбентом для наших целей является гидроксид натрия. Для генерации кислорода, как было отмечено ранее, в нашем случае выбран пероксид кальция. Реакция получения кислорода из данного вещества происходит по схеме:

$$CaO_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2O_2$$

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2\uparrow$$

Положительным фактором является то, что данная реакция происходит при температуре 50 ºС с минимальным выделением тепла.

Оптимальная концентрация пероксида кальция для генератора кислорода составляет 5% масс, а характерное время протекания химической реакции выделения кислорода в смеси реагентов (водная суспензия пероксида кальция) составляет 480 секунд. При этом удельный выход генератора кислорода по отношению к массе пероксида кальция составляет 34 литра O_2 на 1 литр пероксида кальция.

При выборе материала насадок предпочтение отдавалось полимерам, имеющим структуру переменной пористости, которые обладают стойкостью к агрессивным средам, малым гидродинамическим сопротивлением и значительной удельной поверхностью.

При проектировании макетного образца были выбраны пять вариантов насадочных тел различной конфигурации, удельной плотности и схемы заполнения рабочего объема скруббера.

Значительную роль в эффективности работы скруббера играет система орошения, поэтому в процессе проектирования были разработаны несколько вариантов оросителей, имеющих различное число форсунок с различными диаметрами отверстий.

При проектировании автоматической системы управления макетного образца системы регенерации газовоздушной смеси для скруббера предлагаются следующие каналы управления производительностью:

– расход жидкости орошения;

– расход газовоздушной смеси;

– концентрация абсорбента в жидкости орошения (в основном для аварийных ситуаций).

После проведения испытаний на макетном образце, в соответствии с разработанной программой, будут внесены изменения в технологические и конструктивные схемы, а также выданы конкретные рекомендации для разработчиков подобных схем.

Литература

1. Kutateladze S.S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. – New York: Academic Press, 1993. – 385 p.
2. Luitsyansky L.H., Mechanics of fluid and gas. – New York: Wiley, 1961. – 688 p.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. Ч 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 400 с.
4. Путин С.Б. Математическое моделирование и управление процессом регенерации воздуха. М.: Машиностроение, 2008. 176 с.
5. Пронин В.А., Прилуцкий А.А., Долговская О.В., Подболотова Т.Е. Исследование эффективности работы скруббера при поглощении углекислого газа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 4 (26). С. 132-140.
6. Громов Ю.Ю., Матвейкин В.Г., Путин Б.В. Моделирование и управление процессом регенерации воздуха в герметически замкнутом объеме // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 3. № 6. С. 638.
7. Шпилин Д.И., Пронин В.А., Долговская О.В. Совершенствование насадочных абсорбционных систем газоочистки в системах жизнеобеспечения // Вестник Международной академии холода – 2017. № 1. С. 45–48.
8. Пронин В.А., Долговская О.В., Татаренко Ю.В., Гармалыга Ю. Исследование насадок орошаемого скруббера в системах регенерации воздуха при поглощении CO_2 // Вестник Международной академии холода – 2019. № 2. С. 43–48.
9. Дворецкий С.И., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Плотников М.Ю., Суворова Ю.А. Новый подход к регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2012. № 3 (39). С. 159-165.

УДК 697.9

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Б. Сулин, Т.В. Рябова, С.С. Муравейников

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Ryabova_tatyana@itmo.ru

Аннотация
Рассмотрена задача оптимизационного расчета геометрических характеристик оребренной теплообменной поверхности с локальным источником теплоты в условиях естественной конвекции. Решение получено для условия максимальной удельной объемной мощности теплообмена. Предложена инженерная методика учета локального характера приложения тепловой нагрузки. Расчетные характеристики приведены в функции от температурного напора, высоты ребра и толщины основания радиатора.
Ключевые слова
Естественная конвекция, воздушный радиатор, термоэлектрический модуль, оптимизация теплообмена.

Применение радиаторов с естественной конвекцией для отвода теплоты от модулей Пельтье является оправданным, например, для термоэлектрических охладителей малой производительности в связи с высокой надежностью и простотой реализации такого типа конструкций [1 – 3]. В то же время расчет системы теплоотвода с оптимальными геометрическими параметрами при локально приложенной тепловой нагрузке осложнен неодномерностью температурного поля в основании радиатора и требует применения обоснованной расчетной методики.

Решение задачи оптимизации геометрических параметров оребренной системы выполняется на основе совместного анализа процессов теплопроводности в ребрах и теплоотдачи на их поверхности с целью достижения максимального теплового потока при заданном объеме радиатора [4, 5]. Геометрическая схема рассматриваемой системы приведена на рис. 1.

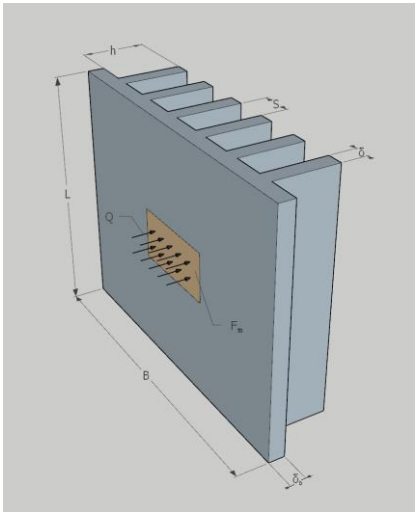


Рис. 1. Геометрическая схема системы

В предположении постоянной величины коэффициента теплоотдачи удельный тепловой поток на единицу объема радиатора может быть записан в виде:

$$q^{\vartheta} = \frac{Q}{V} = \frac{\alpha * \vartheta_0}{h}(1 + \frac{2*h}{S+\delta} * \eta), \quad (1)$$

где Q – тепловая нагрузка от модуля Пельтье, Вт; $V = L * B * h$ – объем, занимаемый радиатором, м^3; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2*К); ϑ_0 – температурный напор в основании ребра, °С; η – эффективность прямого ребра прямоугольного профиля; геометрические характеристики в соответствии с рис. 1.

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции на вертикальных ребрах

$$\alpha = \frac{Nu_S * \lambda_ж}{S}\ , \quad (2)$$

где $\lambda_ж$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м*К).

Число Нуссельта

$$Nu_s = \mathrm{c}_1 (Ra_s \frac{S}{L})^m \left[1 - \exp\left(-c_2 \left(Ra_s \frac{S}{L}\right)\right)\right]^n, \quad (3)$$

где c_1 = 0,112; c_2 = 129; m = 0, 534; n = 0,284.

Число Рэлея

$$Ra_h = \frac{gh^3}{\nu^2}\beta\vartheta_0 Pr, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; β – коэффициент объемного расширения 1/К; Pr – число Прандтля.

Задача оптимизационного расчета заключается в определении межреберного расстояния S и толщины ребра δ, при которых удельный тепловой поток на единицу объема $q^{(V)}$ будет максимальным. Математически оптимизационная задача формулируется уравнениями

$$\frac{\partial q^{(V)}}{\partial \delta} = 0;\ \frac{\partial q^{(V)}}{\partial S} = 0 \quad (5)$$

с учетом зависимостей для коэффициента теплоотдачи (2) и (3), а также выражения для эффективности ребра, аппроксимированного зависимостью

$$\eta = \left(1 + \frac{2}{3}\frac{\lambda_{ж;}}{\lambda}\frac{h^2}{S*\delta}Nu_s\right)^{-1}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала ребра, Вт/(м*К).

Дифференцируя (1) по δ и приравнивая результат нулю с учетом (6) получаем

$$\frac{\delta_{опт}}{h} = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{\alpha S}{\lambda}}. \quad (7)$$

Тогда соотношение (6) с учетом (7) имеет вид

$$\eta = \frac{S}{S+\delta}\ . \quad (8)$$

Дифференцируя (1) по S с учетом (3) и (5) получаем зависимость искомого отношения $\frac{S_{\text{опт}}}{h}$ от комплексов $\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ж}}}$ и $\frac{Ra_h h}{L}$.

Поскольку для газов величина $S_{\text{опт}}$ слабо зависит от теплопроводности ребра можно определить зависимость $S_{\text{опт}}$ от комплекса $\frac{Ra_h h}{L}$.

$$\frac{S_{\text{опт}}}{h} = 3{,}15\left(\frac{Ra_h h}{L}\right)^{-0{,}264}. \tag{9}$$

Записав (9) в виде

$$Ra_S \frac{S}{L} = 80\left(\frac{S}{h}\right)^{0{,}2} \tag{10}$$

можно убедиться, что S слабо зависит от h и определяется параметрами L и ϑ_0. С ростом ϑ_0 и уменьшением L оптимальное межреберное расстояние уменьшается. Величина оптимальной толщины ребра $\delta_{\text{опт}}$ практически не зависит от α и ϑ_0 и определяется в основном параметрами h, b, $\frac{\lambda_{\text{ж}}}{\lambda}$.

Локальный характер приложения тепловой нагрузки к основанию оребренного радиатора предложено учитывать, представляя основание прямоугольным ребром на круглой трубе [6], которая является локальным источником теплоты. Классическое выражение для эффективности ребра [7] преобразуется в вид

$$E_p = \frac{th(mh')}{mh'}. \tag{11}$$

Здесь в выражении

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda\delta_{\text{осн}}}}, \tag{12}$$

где λ и $\delta_{\text{осн}}$ – коэффициент теплопроводности и толщина основания радиатора.

Условная высота прямоугольного ребра

$$h' = 0{,}5d_h(\rho - 1) * (1 + 0{,}35\ln\rho), \tag{13}$$

где условный диаметр локального «пятна» тепловой нагрузки

$$d_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{тб}}}{\pi}}, \tag{14}$$

где $F_{\text{тб}}$– площадь термобатареи (модуля Пельтье).

$$\rho = 1{,}27\frac{c}{d_{\text{н}}}\sqrt{\left(\frac{A}{C}\right) - 0{,}3}, \tag{15}$$

где А – больший размер основания радиатора; С – меньший размер основания радиатора.

На базе описанной методики выполнена серия расчетов оптимальных геометрических характеристик свободно конвективных радиаторов в функции от температурного напора, высоты ребра и толщины основания. Соотношение габаритных размеров основания заданы как 3:1; 1:1; 1:3. На рис. 2 приведены расчетные зависимости для площади основания радиатора оптимальной геометрии при заданном

температурном напоре в основании оребрения 15 К для различных толщин основания и высоты ребер от 20 до 40 мм. Мощность тепловой нагрузки принята равной 25 Вт. Площадь локального источника теплоты принята равной 20 х 20 мм.

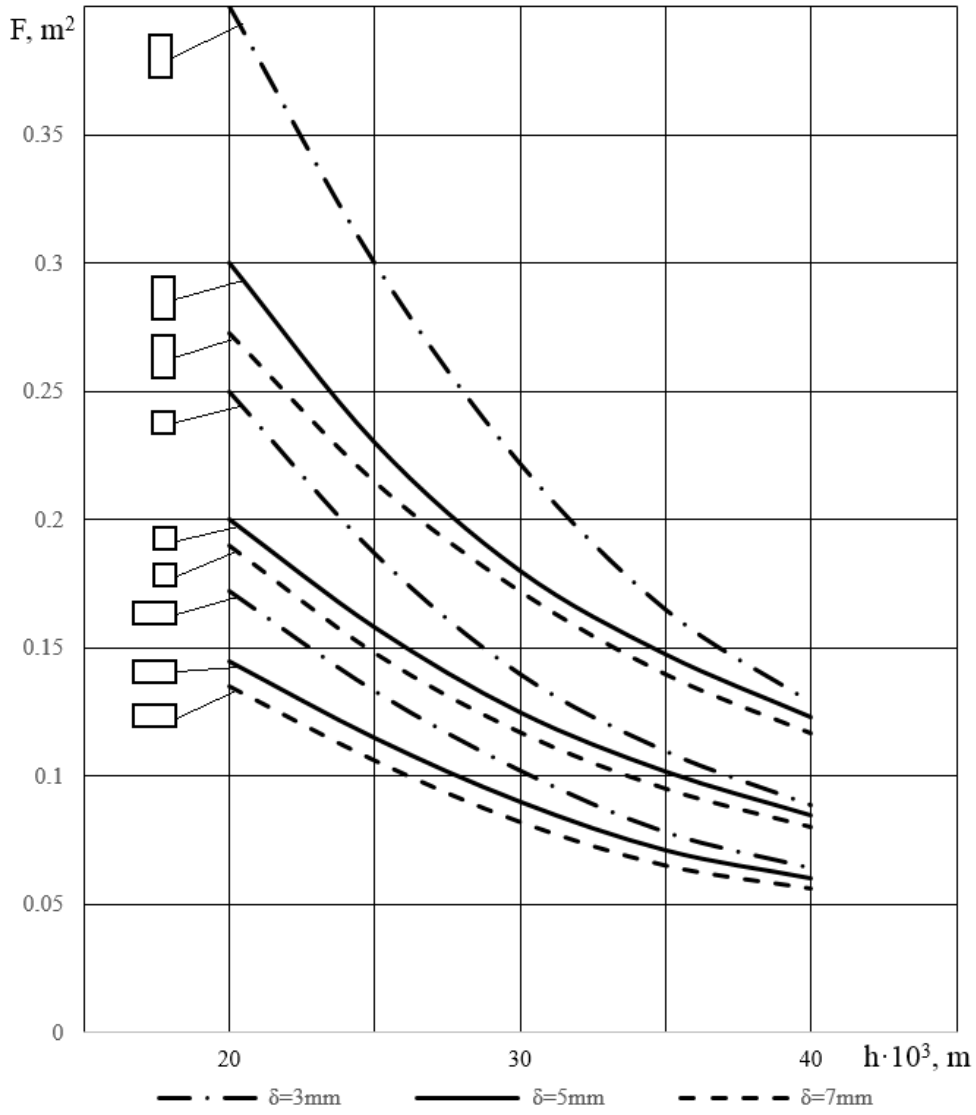


Рис. 2. Геометрические характеристики радиатора оптимальной геометрии

На рис. 3 приведены расчетные зависимости для площади основания радиатора оптимальной геометрии при заданной толщине основания 5 мм в зависимости от высоты ребра и температурного напора.

По результатам серии расчетов могут быть сделаны следующие выводы.

1. Изменение ориентации основания радиатора с вертикальной (1:3) на горизонтальную (3:1) приводит к снижению площади основания примерно вдвое.
2. Увеличение высоты ребра с 20 мм до 40 мм приводит к снижению площади основания в 2-2,5 раза.
3. Увеличение температурного напора от основания ребра к окружающему воздуху от 10 К до 20 К приводит к снижению требуемой площади основания в 3 раза при высоте ребра 40 мм и в 4-5 раз при высоте ребра 20 мм.

Таким образом, теоретически показано, что оптимальная организация геометрии естественно конвективного радиатора может привести к снижению его массогабаритных показателей в 2-3 раза.

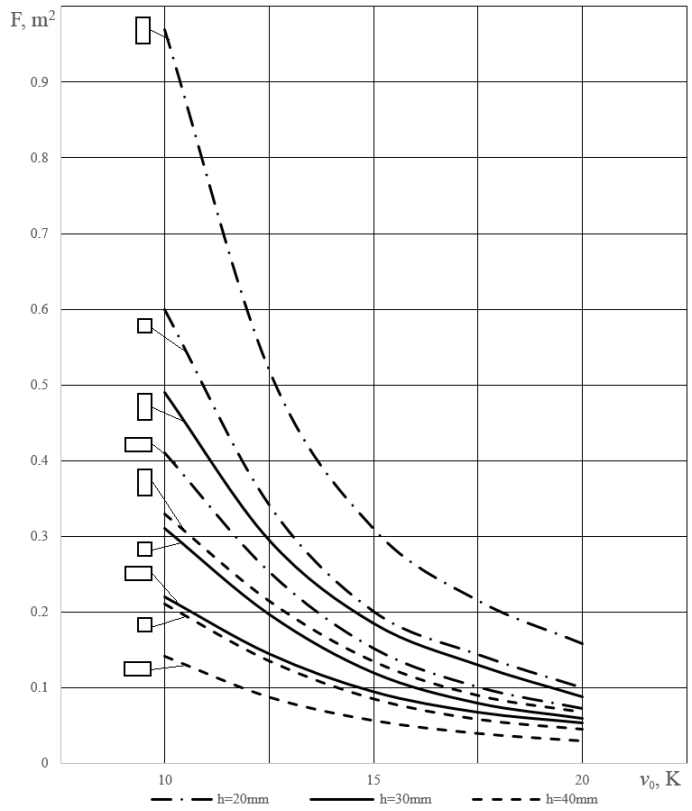


Рис. 3. Геометрические характеристики радиатора оптимальной геометрии

Литература

1. Локоова В.Д., Коломиец М.А. Термоэлектрический модуль пельтье: устройство, принцип действия, характеристики / Современные исследования. 2018. № 1 (05). С. 49-52.
2. Оксенгойт Е.А., Борисов Б.Н., Фролов В.Ф., Шипатов В.Т. Применение термоэлектрических модулей пельтье в газоаналитической аппаратуре / Экологические системы и приборы. 2010. № 6. С. 60-64.
3. Капля В.И., Бурцев А.Г., Андриянов С.А., Соболева Е.К. Расчет режима работы элемента пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха / Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 70.
4. Ройзен Н.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчет оребренных поверхностей М. Энергия, 1977.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М., Энергия, 1977, 464 с.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М. Атомиздат, 1979.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., Энергия, 1975, 488 с.

УДК 697.9

ИСПЫТАНИЯ ВСТРАИВАЕМОГО ВОЗДУШНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ СПИРАЛЬНОГО КОМПРЕССОРА DIGITAL SCROLL

С.С. Муравейников, А.Б. Сулин, А.А. Никитин, Т.В. Рябова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ssmuraveinikov@corp.ifmo.ru

Аннотация

Приведены данные испытаний встраиваемого воздушного теплоутилизатора, описана конструкция испытываемого устройства и испытательного стенда. Описаны механизмы регулирования и их влияние на эксплуатационные показатели. Продемонстрирован метод оценки среднегодовой эффективности теплоутилизирующих компонентов систем жизнеобеспечения.

Ключевые слова

Вентиляция, системы жизнеобеспечения, утилизация теплоты, тепловой насос, показатели энергоэффективности.

Ввиду широкого распространения систем принудительной вентиляции, обусловленного возрастающими требованиями комфорта и безопасности [1, 2], актуальной задачей является разработка компонентов, позволяющих осуществить модернизацию и доработку существующих вентиляционных систем [3]. С этой целью коллективом была предложена конструкция устройства, позволяющего осуществлять комплексную тепловую обработку воздуха и утилизацию тепловой энергии при минимальном вмешательстве в структуру модернизируемых систем жизнеобеспечения. Разработано устройство централизованной обработки воздуха – встраиваемый воздушный теплоутилизатор (ВВТ). Разработан модельный ряд ВВТ для систем вентиляции с расходом воздуха от 2500 до 10000 м^3/ч, изготовлен опытный образец и проведены его предварительные испытания.

Разработанное устройство состоит из трех основных узлов: головного блока, аппарата теплообменного линии вытяжки (АТЛВ) и аппарата теплообменного линии притока (АТЛП). Ключевые функциональные компоненты ВВТ сосредоточены в головном блоке, располагаемом отдельно от сети воздуховодов, что позволяет минимизировать вмешательство в её конструкцию при модернизации. К головному блоку подводятся трубопроводы систем отопления, кабели электропитания и при необходимости линии связи ВВТ с контроллером существующей системы вентиляции.

Гидравлическая схема головного блока позволяет с использованием АТЛП выполнять весь перечень задач тепловой обработки воздуха в системах вентиляции: подвод теплоты, утилизированной на вытяжной линии; подвод теплоты от внешнего источника; а также охлаждение воздуха в теплый период года. В данной статье приведены результаты испытаний ВВТ в режиме «нагрев», объединяющем первые две из вышеописанных функций.

В головном блоке располагается реверсивный тепловой насос на базе компрессора «Copeland ZPD 61» с функцией регулирования производительности «Digital Scroll». В режиме «нагрев» АТЛВ выполняет функцию испарителя, конденсация происходит в промежуточном пластинчатом теплообменном аппарате АТП. Снабжение АТЛП теплоносителем осуществляется посредством работы насоса

смесительного узла. Теплоноситель при номинальной и меньших нагрузках циркулирует между АТЛП и АТП, передавая тепловую энергию конденсации приточному воздуху. При нагрузках, превышающих номинальную производительность теплового насоса, путем регулирования трёхходового клапана смесительного узла осуществляется подача в контур некоторого количества горячей воды из системы отопления. АТПЛ подобран таким образом, что при понижении температуры воздуха перед ним, возрастающий температурный напор между теплоносителем и воздухом обеспечивает достаточный теплосъем для поддержания постоянной температуры обратной воды при повышении температуры подаваемого в АТЛП теплоносителя. Это позволяет поддерживать постоянные условия конденсации в АТ1 при переменных нагрузках.

Испытания проводились в период с февраля по апрель 2019г в лаборатории систем жизнеобеспечения факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО. Для проведения испытаний ВВТ был встроен в существующую лабораторную систему вентиляции согласно схеме испытаний.

Для определения среднегодовых показателей работы ВВТ в режиме «нагрев» был собран массив данных о температурах воздуха в контрольных точках вентиляционной сети – до и после мест установки АТЛВ и АТЛП по направлению движения воздуха (точки 1, 2, 3 и 4 на схеме испытаний), а также данные электропотребления ВВТ [4]. Показатели снимались с интервалом 1ч. Для измерения температур использован многофункциональный прибор Testo 480, данные энергопотребления были получены при помощи универсального токоанализатора CIRCUTOR AR5-L. Поскольку в конструкции ВВТ применен компрессор Digital Scroll имеющий неравномерную функцию потребления [5], потребленная электрическая энергия измерялась за усредненный период в 1ч. Расход воздуха системы вентиляции был отрегулирован до значения 2500 м^3/ч на линиях притока и вытяжки. Результаты измерений температур в контрольных точках представлены на рис. 1. За исследованный период получены наборы данных для целых значений температур наружного воздуха от минус 18 до 20℃.

Рис. 1. Результаты измерений температур в контрольных точках вентиляционной сети

Полученный массив данных, содержащих температуры обрабатываемого воздуха в контрольных точках (T_{1i}, T_{2i}, T_{3i}, T_{4i}), а также показатели электропотребления N_i использованы для получения характерных энергетических показателей, соответствующих целым значениям температур наружного воздуха.

Для отдельных целых значений температур наружного воздуха вычислены значения производительности АТЛП:

$$Q_{HESLi} = G_{sa} C_{sai} \rho_{sai} (T_{2i} - T_{1i})$$

где: G_{sa} – расход воздуха на линии притока, м^3/ч;

C_{sai} – теплоемкость воздуха на линии притока при температуре T_{1i}, Дж/К;

ρ_{sai} – плотность воздуха на линии притока при температуре T_{1i}, кг/м^3;

При различных температурах наружного воздуха, производительность АТЛП определяется различными составляющими. Так уравнение теплового баланса для контура теплоносителя при номинальной и меньших нагрузках имеет вид:

$$Q_{HESL} = Q_{cd} = G_w C_w \rho_w (T_{w4} - T_{w3})$$

где: Q_{cd} – производительность конденсатора теплового насоса, Вт;
G_w – расход теплоносителя через конденсатор теплового насоса, м^3/ч;
C_w, ρ_w – теплоёмкость воды, Дж/К;
C_w, ρ_w – плотность воды, кг/м^3;
T_{w3}, T_{w4} – температура воды на входе и выходе из конденсатора теплового насоса соответственно, ºС.

В таком случае регулирование производительности осуществляется обратным широтно-импульсным модулированием (ШИМ), поскольку диапазон возможных тепловых нагрузок совпадает с диапазоном регулирования компрессора Digital Scroll [6].

В случае превышения нагрузкой на АТЛП верхней границы диапазона производительности теплового насоса, задействуется подвод теплоносителя от системы отопления, а уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q_{HESL} = Q_{cd} + Q_{hs} = G_w C_w \rho_w (T_{w4} - T_{w3}) + G_{whs} C_w \rho_w (T_{w6} - T_{w5})$$

где: Q_{hs} – производительность внешнего источника тепловой энергии, Вт;
G_{whs} – расход теплоносителя системы отопления, м^3/ч;
T_{w5}, T_{w6} – температуры подводимого и отводимого теплоносителя системы отопления соответственно, ºС.

Для обоих случаев производительность конденсатора рассчитана как сумма холодопроизводительности испарителя энергопотребления ВВТ, поскольку потери в компрессоре преобразуются в тепловую энергию и передаются в конденсатор.

$$Q_{cdi} = G_{ea} C_{eai} \rho_{eai} (T_3 - T_4) + N_i$$

где: G_{sa} – расход воздуха на линии вытяжки, м^3/ч;
C_{sai} – теплоемкость воздуха на линии вытяжки при температуре T_{3i}, Дж/К;
ρ_{sai} – плотность воздуха на линии вытяжки при температуре T_{3i}, кг/м^3;

Таким образом если $Q_{HESLi} = Q_{cdi}$, подвод теплоносителя системы отопления не задействован, а если $Q_{HESLi} > Q_{cdi}$, то тепловая энергия системы отопления подводится к АТЛП, и количество этой энергии определяется как:

$$Q_{hs} = G_{sa} C_{sai} \rho_{sai} (T_{2i} - T_{1i}) - (G_{ea} C_{eai} \rho_{eai} (T_3 - T_4) + N_i)$$

Поскольку расходы подводимого и отводимого теплоносителя для приведенной гидравлической схемы равны, а $T_{w6} = T_{w4}$, при регулировании РВ1 часть энергии конденсатора используется на подогрев теплоносителя, удаляемого из контура в систему отопления. Тем не менее, виду того, что при учете потребляемой тепловой

энергии системы отопления помимо расхода учитывается тепловая энергия обратной воды, данная энергия затрачивается на снижение фактического потребления тепла.

Полученные энергетические показатели (рис. 2) характеризуют работу ВВТ при определенных температурах наружного воздуха. При известном статистическом распределении продолжительности наблюдения температур наружного воздуха в регионе испытаний [7], рассчитаны среднегодовые значения энергетических показателей.

Рис. 2. Энергетические показатели

Среднегодовая производительность ВВТ в режиме «нагрев»:

$$Q_{HESL} = \sum (Q_{HESLi} \cdot \tau_i)$$

где: τ_i – количество часов наблюдения температуры наружного воздуха T_{1i}, ч.

Среднегодовое потребление ВВТ тепловой энергии системы отопления:

$$Q_{hs} = \sum (Q_{hsi} \cdot \tau_i)$$

Среднегодовое электропотребление ВВТ:

$$N = \sum (N_i \cdot \tau_i)$$

На основании среднегодовых показателей рассчитан коэффициент среднегодовой энергетической эффективности испытываемого устройства:

$$K = \frac{Q_{HESL} - (N + Q_{hs})}{Q_{HESL}} \cdot 100\%$$

По результатам испытаний среднегодовая производительность ВВТ в режиме «нагрев» составила 127414 кВт·ч, среднегодовое потребление ВВТ тепловой энергии системы отопления – 17463 кВт·ч, среднегодовое электропотребление ВВТ – 19959 кВт·ч, коэффициент среднегодовой энергетической эффективности – 70,6%.

На примере испытаний действующего опытного образца отработана методика расчетной оценки среднегодовой эффективности систем жизнеобеспечения,

продемонстрированы на практике алгоритмы расчетов с использованием экспериментальных данных. Методика предлагается к внедрению практику проектирования систем жизнеобеспечения при сравнении конкурирующих технических решений по критериям энергосбережения.

Литература

1. Awbi H.B. Ventilation of buildings, Second Edition – London. Taylor & Francis, 2003.
2. Bakó-Biró Z., Kochhar N., Clements-Croome D.J., Awbi H.B., Williams M. Ventilation rates in schools and pupil's performance using computerized assessment tests // Proceedings of Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark, Paper No. 880.
3. Муравейников С.С., Сорокин С.А., Никитин А.А. Разработка встраиваемого воздушного теплоутилизатора для модернизации существующих вентиляционных систем // VIII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 15-17ноября 2017г.): Материалы конференции –2017. – С. 162-164.
4. Muraveinikov S.S., Sulin A.B., Nikitin A.A., Baranov I.V., Average Annual Efficiency Evaluation in the Design of Life Support Systems // AIP Conference Proceedings, IET – 2019, Vol. 2141, pp. 030019-1 - 030019-6H.
5. Huang Q., Yuan D., Qin Z., Zhang Z., An experimental study on variable air volume operation of ducted air-conditioning with digital scroll compressor and conventional scroll compressor // Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issue 7, 2008, C 761-766.
6. Wu X., Xing Z., He Z., Wang X., Chen W., Performance evaluation of a capacity-regulated high temperature heat pump for waste heat recovery in dyeing industry // Applied Thermal Engineering, Volume 93, 2016, Pages 1193-1201.
7. Климатические данные [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://rp5.ru/, своб.

УДК 628.84

СНИЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ПРИТОЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ АККУМУЛЯЦИИ ХОЛОДА

А.Л. Тимофеевский, И.А. Глушков, О.В. Иванушкина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

alt1960@mail.ru

Аннотация
Предложены технические решения на основе, значительно снижающие эксплуатационные затраты систем холодоснабжения климатических установок.
Ключевые слова
Кондиционирование воздуха, энергосбережение, чиллер, аккумулятор.

Климатические системы являются одними из самых энергозатратных систем в инженерной структуре объектов строительства, поэтому поиск решений, снижающих их энергопотребление, является актуальной задачей [1].

В теплый период года тепловая нагрузка на приточные системы вентиляции общественных, производственных и жилых промышленных зданий в течение суток обычно является неравномерной, значительно уменьшаясь в ночное время и резко возрастая в дневное. К тому же пиковые теплопритоки, для компенсации которых подбираются системы холодоснабжения, как правило, кратковременны, и большую часть времени климатическое оборудование недогружено [2].

Такой характер нагрузки позволяет снизить эксплуатационные расходы на систему холодоснабжения (СХС) за счет использования аккумуляторов холода [2, 3, 4]**.** В этом случае холодильная машина для зарядки аккумулятора работает в ночное время, и потребляемая в этот период электроэнергия оплачивается по более низкому тарифу.

Кроме того, использование холодильной машины меньшей мощности снижает расходы на ее обслуживание, уменьшает затраты на сопутствующее электрическое оборудование и снижает плату за установленную мощность, а равномерность выработки холода в течение суток уменьшает нагрузку на электросети.

В [4] показано, что при типичной для офисного здания тепловой нагрузке использование в системе холодоснабжения льдоаккумулятора (ЛА) значительно уменьшает необходимую мощность чиллера. В то же время это требует дополнительной автоматизации системы и увеличения количества насосных групп (рис. 1) из-за необходимости установки промежуточного теплообменника между циркуляционными контурами воды и гликоля, что связано с запретом использования антифризов в фанкойлах климатических систем общественных и жилых зданий в нормативных документах [5].

Если перед проектировщиком стоит задача максимально возможного снижения энергопотребления СХС приточных вентиляционных установок (ПВУ), то применение ЛА позволяет решить ее значительно проще с точки зрения схемного решения по сравнению с системой “чиллер-фанкойл”, показанной на рис. 1 (рис. 2).

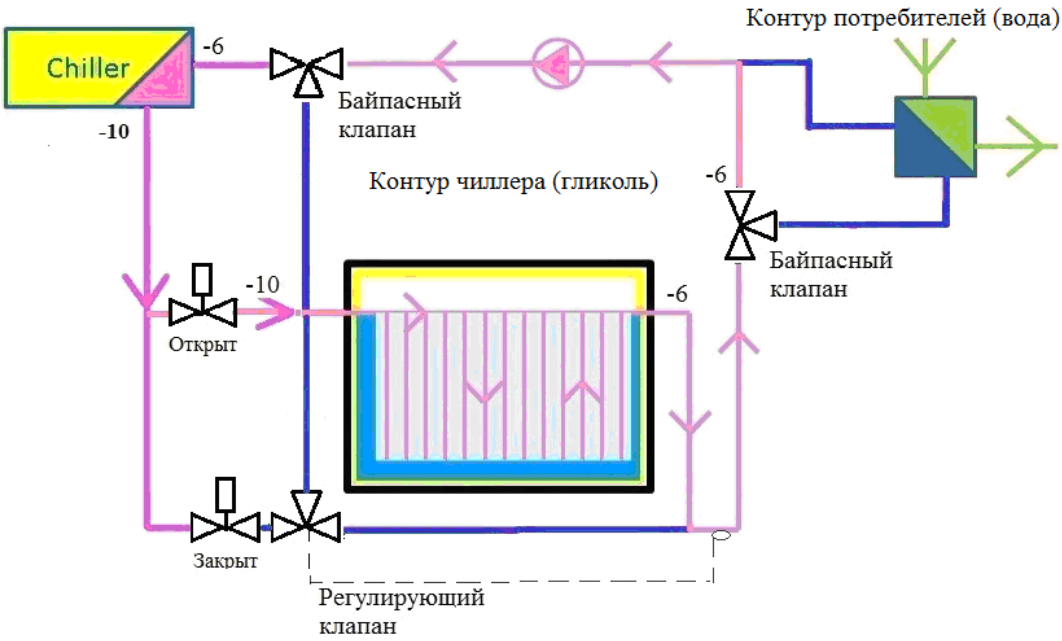


Рис. 1. Схема СХС на основе фанкойлов с использованием льдоаккумулятора

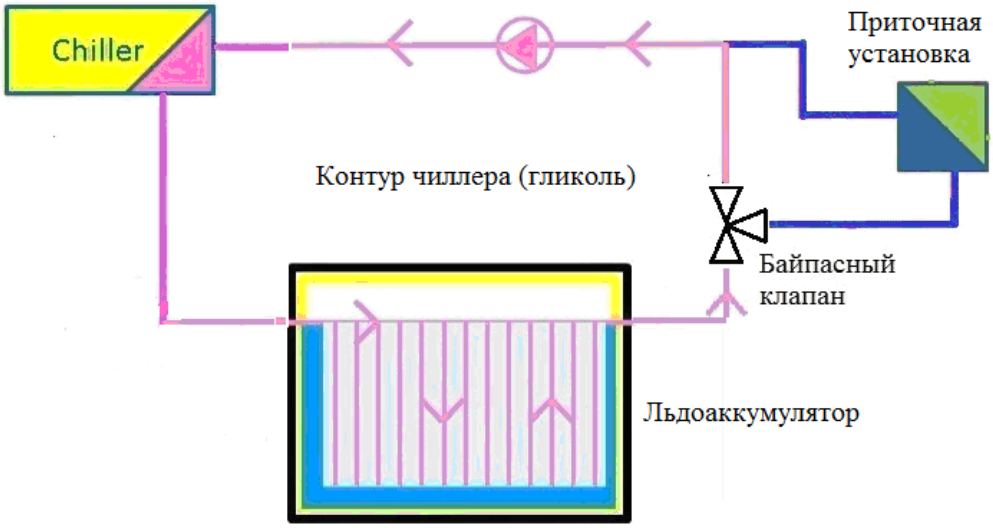


Рис. 2. Схема СХС приточной установки с льдоаккумулятором

В данной конфигурации СХС чиллер и воздухоохладитель ПВУ работают на гликоле, что является достаточно распространенным вариантом в климатической отрасли, например при использовании оборудования наружной установки. Некоторой особенностью системы управления является то, что контроллер чиллера должен иметь функцию автоматического переключения уставки температуры хладоносителя в дневное и ночное время, а также управления байпасным клапаном. Это позволяет в ночное время включать режим замораживания льда в льдоаккумуляторе, байпасируя теплообменник ПВУ, а в дневное время использовать лед, намороженный за ночь на трубах льдоаккумулятора, для охлаждения воздуха в ПВУ.

В настоящее время контроллеры чиллеров с двойной уставкой обычно входят в стандартную заводскую поставку машин с номинальной холодопроизводительностью более 100 кВт, а в случае самостоятельного изготовления чиллеров меньшей

производительности найти такой контроллер в линейке ведущих производителей автоматики не составляет труда.

Применение ЛА целесообразно для холодоснабжения ПВУ с холодильной мощностью более 100 кВт и неравномерной тепловой нагрузкой в дневное и ночное время, что позволяет значительно снизить затраты на их эксплуатацию. Особенно актуальным такой вариант может стать при использовании ПВУ для компенсации внутренних теплопритоков в здании, так как в этом случае требуется охлаждать приточный воздух до температуры ниже +20°С. Использование ЛА позволяет получить более низкую температуру гликоля, подаваемого в теплообменник ПВУ, и уменьшить за счет этого его поверхность.

Расчеты чиллеров с льдоаккумулятором для типичных ПВУ общественных зданий, выполненные с помощью программы, разработанной в [4], позволяют сделать следующие выводы:

1. При тепловой нагрузке, существенно неравномерной в течение суток, использование ЛА в системе холодоснабжения ПВУ позволяет уменьшить требуемую производительность чиллера примерно в 2 раза.
2. Капитальные затраты на системы холодоснабжения ПВУ с ЛА и без него близки. Приведенные затраты на систему холодоснабжения с ЛА ниже затрат на традиционную систему на 15-25%. В случае необходимости подвода к зданию дополнительной электрической мощности приведенные затраты на систему холодоснабжения с ЛА могут быть ниже, чем на традиционную систему холодоснабжения на 30-45%.
3. Гидравлическая схема системы холодоснабжения приточной вентиляционной установки (или нескольких ПВУ) с ЛА (рис. 2) значительно проще аналогичной системы холодоснабжения на основе фанкойлов (рис.1).
4. Основной причиной, тормозящей внедрение льдоаккумуляторов в системах кондиционирования воздуха, являются их габаритные размеры.
5. Льдоаккумуляторы, при возможности размещения их на объекте, могут быть рекомендованы для использования в системах холодоснабжения климатических установок с целью снижения эксплуатационных затрат и пиковых нагрузок на электросети.

Литература

1. Вишневский Е.П. Проблемы энергосбережения при проектировании и эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Журнал С.О.К., №6, 2004.
2. Ефремов В.В., Наумов А.Л., Серов С.Ф. Использование аккумуляторов холода в системах кондиционирования воздуха. ISSN 1994-0351. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политематическая сер. 2010. Вып. 3 (13).
3. Селиверстов Ю.М., Ефремов В.В. Экономика систем кондиционирования воздуха с аккумулятором холода// АВОК. – 2013. – № 1, с. 30-36.
4. Соловей Н.А. Возможности использования аккумулированного холода в системах кондиционирования воздуха: дипл. работа (диссертация магистра). Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2018.
5. Свод правил СП 60.13330.2012 "СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха". Дата введения 1 января 2013 г.

УДК 629.048.4: 628.84

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

А.А. Серов, А.В. Цыганков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

serov_sasha@bk.ru

Аннотация

В статье рассмотрена эффективность каналов насадки регенеративного теплообменника. Предложена идея повышения эффективности насадки регенеративного теплообменника. Получены расчётные данные изменения коэффициентов аккумуляции и регенерации при изменении толщины стенки каналов.

Ключевые слова

Теплообменник, вентиляция, насадка регенеративного теплообменника, энергосбережение.

В настоящее время одним из самых актуальных направлений исследований являются энергосберегающие технологии. Каждый год человечество потребляет всё больше и больше энергии. В частности, немалое количество энергии затрачивается на вентиляцию и подогрев воздуха в помещениях. Широкое распространение в этой области нашли регенеративные теплообменники. Они проводят вентиляцию помещений, при этом регенерируя часть теплоты воздуха из помещения.

В работе рассмотрен теоретический расчёт коэффициентов аккумуляции и регенерации. Программа для расчёта написана на языке Visual Studio C++, основной метод, используемый для расчёта коэффициентов аккумуляции и регенерации, описан в статье [1].

Насадка регенератора является теплообменника. Её каналы попеременно забирают и отдают теплоту вытяжного и приточного воздуха соответственно. Теплота передаётся от воздуха к стенкам канала. Однако теплообмен проходит неравномерно – на торцах каналов он проходит интенсивнее, чем в середине канала. В соответствии с этим температура на торцах имеет большие изменения, чем в середине канала. Пример этого изображен на рисунке.

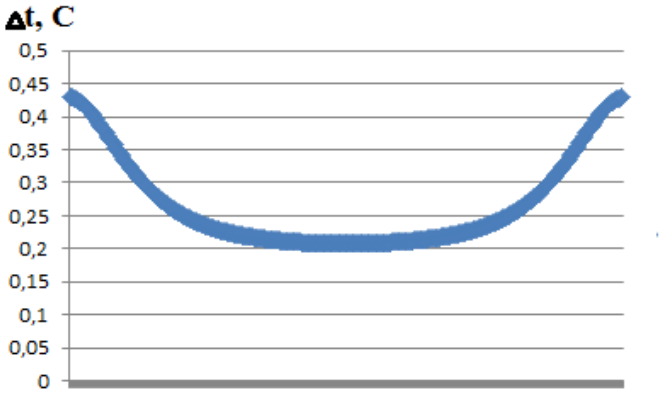


Рисунок. Изменение температуры канала насадки по всей длине между циклами аккумуляции и регенерации

В целях повышения эффективности регенеративной насадки предложена идея линейно уменьшать толщину каналов насадки от торцов к середине. Это должно привести к увеличению теплообмена ближе к середине насадки, уменьшению теплопроводности по длине канала, уменьшению затрат на материал насадки, а так же уменьшению массы самой насадки.

Далее приведён расчёт коэффициентов аккумуляции и регенерации для трёх разных материалов и при сужении стенки в середине канала вплоть до 50%. Материал 1 – теплоёмкость $904\frac{Дж}{кг*К}$, теплопроводность $236\frac{Вт}{м*К}$, плотность $2697\frac{кг}{м^3}$. Материал 2 – теплоёмкость $504\frac{Дж}{кг*К}$, теплопроводность $26\frac{Вт}{м*К}$, плотность $1447\frac{кг}{м^3}$. Материал 3 – теплоёмкость $707\frac{Дж}{кг*К}$, теплопроводность $104\frac{Вт}{м*К}$, плотность $885\frac{кг}{м^3}$. Результаты приведены в таб.1, 2 и 3.

Таблица 1

Коэффициенты аккумуляции и регенерации при изменении толщины стенки, материал 1

Толщина стенки в середине канала	100%	90%	80%	50%
Коэффициент аккумуляции/регенерации	0.6449	0.6492	0.6538	0.6702

Таблица 2

Коэффициенты аккумуляции и регенерации при изменении толщины стенки, материал 2

Толщина стенки в середине канала	100%	90%	80%	50%
Коэффициент аккумуляции/регенерации	0.7451	0.7463	0.7477	0.7517

Таблица 3

Коэффициенты аккумуляции и регенерации при изменении толщины стенки, материал 3

Толщина стенки в середине канала	100%	90%	80%	50%
Коэффициент аккумуляции/регенерации	0.6947	0.6981	0.7016	0.7131

По результатам расчётов, при линейном уменьшении толщины стенки канала к его середине, замечено повышение коэффициентов аккумуляции и регенерации для всех выбранных материалов. Однако требуются дальнейшие исследования в этой области для определения эффективности использования таких каналов.

Литература

1. Серов А.А., Шилин А.С. Методика расчёта эффективности регенеративного теплообменника // Материалы восьмой международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы морской энергетики” – 2019. – с. 303-307.

УДК 628.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

А.С. Шилин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

0346440@mail.ru

Аннотация
Актуальность настоящей работы определяется необходимостью повышения энергетической эффективности систем обеспечения микроклимата (систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) общественных зданий при поддержании комфортных условий микроклимата в обслуживаемых помещениях. Рассматриваемая проблема является многофакторной и включает в себя несколько направлений уменьшения затрат энергетических и материальных ресурсов, наиболее перспективными из которых являются оптимизация систем обеспечения микроклимата и выбор оптимально режима их управления. В ходе исследования была разработана математическая модель оптимизации технических решений систем обеспечения микроклимата и режима их функционирования, процессов тепломассопереноса в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, позволяющая определять параметры микроклимата в помещениях в зависимости от прогнозируемых внешних климатических условий, теплоаккумулирующих свойств ограждающих конструкций и режима эксплуатации общественных зданий.
Ключевые слова
Системы обеспечения микроклимата, микроклимат помещений, энергетическая эффективность, энергосбережение, оптимизация систем обеспечения микроклимата.

Для определения потенциала энергопотребления здания необходимо иметь объективную информацию о его энергетических показателях. Актуальность этого вопроса непосредственно связана с эффективностью использования энергоресурсов в технологических процессах систем обеспечения микроклимата в зданиях и сооружениях.

Системы обеспечения микроклимата (системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) зданий и сооружений являются одними из наиболее крупных потребителей тепловой энергии. По некоторым оценкам, они потребляют до 40% добываемого в стране твердого и газообразного топлива и до 10% производимой электрической энергии [1]. В связи с этим, повышение энергетической эффективности систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений является актуальной задачей. Для достижения данной цели существует несколько направлений уменьшения затрат природных ресурсов, затрачиваемых в этих системах, наиболее перспективными из которых являются оптимизация систем обеспечения микроклимата и выбор оптимального режима их управления [2].

При выборе схем систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха основную роль играют стоимостные и натуральные показатели: энергетическая эффективность, потребляемая электрическая мощность, расход теплоты и холода, воды и водяного пара. В то же время выбор технических решений систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха зависит от множества факторов: объемно-планировочных решений зданий и сооружений, требований нормативных документов к

инженерным системам, конструктивных особенностей, требований заказчиков и др. В некоторых случаях, оптимальное для одного объекта решение систем обеспечения микроклимата, является неприменимым на другом объекте, поэтому необходимо рассматривать все возможные оптимальные варианты инженерных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений.

С целью оптимизации технических решений систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий была разработана математическая модель, позволяющая решать нестационарную задачу тепломассопереноса через наружные ограждающие конструкции зданий и сооружений. Решение уравнений разработанной математической модели позволяет определять величины температур внутреннего воздуха помещений, температур внутри ограждений, а также температуры на его внутренних и наружных поверхностях в зависимости от температуры наружного воздуха и поступлений теплоты в помещения в любой момент времени. Определение значений этих температур позволяет рассчитать величину теплового потока, проходящего через ограждения помещений и выбрать оптимальную технологическую схему обработки воздуха, подобрать оптимальный вариант оборудования систем обеспечения микроклимата и выбрать оптимальный режим управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с целью создания комфортных условий для пребывающих в помещениях людей.

Уравнение теплового баланса помещения:

$$Q_2 - Q_1 = Q_4 - Q_3, \tag{1}$$

где Q_1– количество теплоты в помещении в момент времени (k), Вт:

$$Q_1 = t_1^k \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot V_{in}, \tag{2}$$

где t_1^k – температура в помещении в момент времени k, °С; c_{a} – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); ρ_{a} – плотность воздуха, кг/м^3; V_{in}– объем помещения, м^3.
Q_2 – количество теплоты в помещении в момент времени (k +1), Вт:

$$Q_2 = t_1^{k+1} \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot V_{in}, \tag{3}$$

где t_1^{k+1}– температура в помещении в момент времени (k + 1).
Q_3 – количество теплоты, вошедшей (вышедшей) с тепловым потоком q_{in}, Вт:

$$Q_3 = (q_{in}^{\frac{k+1}{2}}) \cdot \Delta\tau, \tag{4}$$

где q_{in} – теплопоступления в помещение, Вт; $\Delta\tau$ – шаг по времени, с.
Q_4 – количество теплоты, вошедшей (вышедшей в ограждение), Вт:

$$Q_4 = \frac{1}{2}(t_1^{\frac{k+1}{2}} - t_2^{\frac{k+1}{2}}) \cdot \alpha_{in} \cdot S_{in} \cdot \Delta\tau, \tag{5}$$

где t_1 – температура в помещении, °С; t_2 – температура внутренней поверхности ограждения, °С; α_{in} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/(м^2·°С); S_{in} – площадь внутренней поверхности ограждения, м^2.

Примем, что изменение температуры по толщине ограждения описывается полиномом второй степени:

$$t(h) = \sum_{i=0}^{2} a_0 h^i, \tag{6}$$

Тогда среднеинтегральная температура ограждения, вычисленная по формуле Симпсона, имеет вид:

$$t_w = \frac{1}{6}t_2 + \frac{2}{3}t_3 + \frac{1}{6}t_4, \quad (7)$$

где t_2 – температура внутренней поверхности ограждения, °С; t_3 – температура в центре ограждения, °С; t_4 – температура наружной поверхности ограждения, °С;

Уравнение теплового баланса ограждения:

$$Q_6 - Q_5 = Q_8 - Q_7, \quad (8)$$

где Q_5 – количество теплоты в ограждении в момент времени (k), Вт:

$$Q_5 = t_w^k \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot V_w, \quad (9)$$

где t_w^k – среднеинтегральная температура ограждения в момент времени (k), °С; c_w – удельная теплоемкость ограждения, Дж/(кг·°С); ρ_w – плотность материала ограждения, кг/м^3; V_w– объем ограждения, м^3.

Q_6 – количество теплоты в ограждении в момент времени (k +1), Вт:

$$Q_6 = t_w^{k+1} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot V_w, \quad (10)$$

где t_w^{k+1} – среднеинтегральная температура ограждения в момент времени *(k + 1)*.

Q_7 – теплообмен в помещении, Вт:

$$Q_7 = Q_4 \quad (11)$$

Q_8 – внешний теплообмен, Вт:

$$Q_8 = \frac{1}{2}(t_4^k + t_4^{k+1} - t_{out}^k - t_{out}^{k+1}) \cdot \alpha_{out} \cdot S_{out} \cdot \Delta\tau, \quad (12)$$

где t_4^k – температура наружной поверхности ограждения в момент времени (k), °С; t_4^{k+1} – температура наружной поверхности ограждения в момент времени (k + 1), °С; t_{out}^k – температура наружного воздуха в момент времени (k), °С; t_{out}^{k+1} – температура наружного воздуха в момент времени (k + 1), °С; α_{out} – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности Вт/(м^2·°С); S_{out} – площадь наружной поверхности, м^2; Δτ – шаг по времени, с.

Уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda_w}{c_w \cdot \rho_w}\left(\frac{d^2t}{dx^2}\right) \quad (13)$$

$$\left(\frac{dt}{d\tau}\right)^k = \frac{t_3^{k+1} - t_3^{k-1}}{2\Delta\tau} \quad (14)$$

$$\left(\frac{d^2t}{dx^2}\right)^k = \frac{t_4^k - 2t_3^k + t_2^k}{\left(\frac{h_w}{2}\right)^2} \quad (15)$$

$$\frac{t_3^{k+1} - t_3^{k-1}}{2\Delta\tau} = \left(\frac{\lambda_w}{c_w \cdot \rho_w}\right) \cdot \frac{t_4^k - 2t_3^k + t_2^k}{\left(\frac{h_w}{2}\right)^2}, \quad (16)$$

где t_2^k – температура внутренней поверхности ограждения в момент времени (k), °С; t_3^k

– температура в центре ограждения в момент времени (k), °С; t_3^{k+1} – температура в центре ограждения в момент времени (k + 1), °С; t_3^{k-1} – температура в центре ограждения в момент времени (k - 1), °С; t_4^k – температура наружной поверхности ограждения в момент времени (k), °С; λ_w – теплопроводность материала ограждения, Вт/(м·°С); h_w – толщина ограждения, м.

Общее уравнение теплового баланса:

$$Q_2 - Q_1 + Q_6 - Q_5 + Q_8 = q_{in}, \tag{17}$$

Таким образом, математическая модель оптимизации систем обеспечения микроклимата представляет собой систему четырех уравнений:

$$\begin{cases} Q_2 - Q_1 = Q_4 - Q_3 \\ Q_6 - Q_5 = Q_8 - Q_7 \\ \frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda_w}{c_w \cdot \rho_w}\left(\frac{d^2t}{dx^2}\right) \\ Q_2 - Q_1 + Q_6 - Q_5 + Q_8 = q_{in} \end{cases} \tag{18}$$

Разработанная математическая модель позволяет определять величины тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции, температуры в помещении, внутри ограждения и на его поверхностях в любой момент времени, что позволяет, в зависимости от режима работы здания, задать оптимальный режим функционирования систем обеспечения микроклимата.

Разработанная математическая модель и программа, разрабатываемая на ее основе, позволит инженерам быстро и качественно проектировать системы обеспечения микроклимата при строительстве или реконструкции зданий и сооружений.

В дальнейшем, разработанная модель будет дополняться, чтобы учесть различные факторы изменения микроклимата в зданиях и сооружениях, а именно:

– учет инфильтрации через неплотности наружных ограждений;
– учет лучистого теплообмена;
– учет процессов массопереноса влажного воздуха.

На основе разработанной математической модели, было проведено математическое моделирование процессов теплопереноса в учебной лаборатории факультета низкотемпературной энергетики университета ИТМО в холодный период года. В помещении лаборатории имеются поступления теплоты от системы водяного отопления, компенсирующей потери теплоты через наружные ограждающие конструкции в холодный период года, а также поступления теплоты от пребывающих в помещении людей и оборудования. Для обеспечения воздухообмена, в помещение лаборатории подается свежий обработанный наружный воздух при помощи системы общеобменной вентиляции, функционирующей в период проведения занятий (с 9:00 до 18:00) из расчета 40 м^3/ч на человека, в соответствии с требованиями нормативных документов [3].

Результаты математического моделирования, произведенные на основе разработанной математической модели для нерегулируемых систем обеспечения микроклимата приведены на рис. 1

В помещении лаборатории поддерживаются оптимальные комфортные условия микроклимата для пребывания людей. Однако, в периоды, когда в помещении отсутствуют люди, поддерживать оптимальную температуру воздуха нецелесообразно. В целях уменьшения затрат натуральных и стоимостных ресурсов, необходимо и достаточно поддерживать температуру воздуха в помещении, предотвращающую

выпадения конденсата на его внутренних поверхностях. К тому же, отсутствие циркуляции воздуха в периоды, когда в помещении отсутствуют люди, приводит к образованию застойных зон, в связи с чем, необходимо и достаточно поддерживать минимальный расход воздуха в помещении.

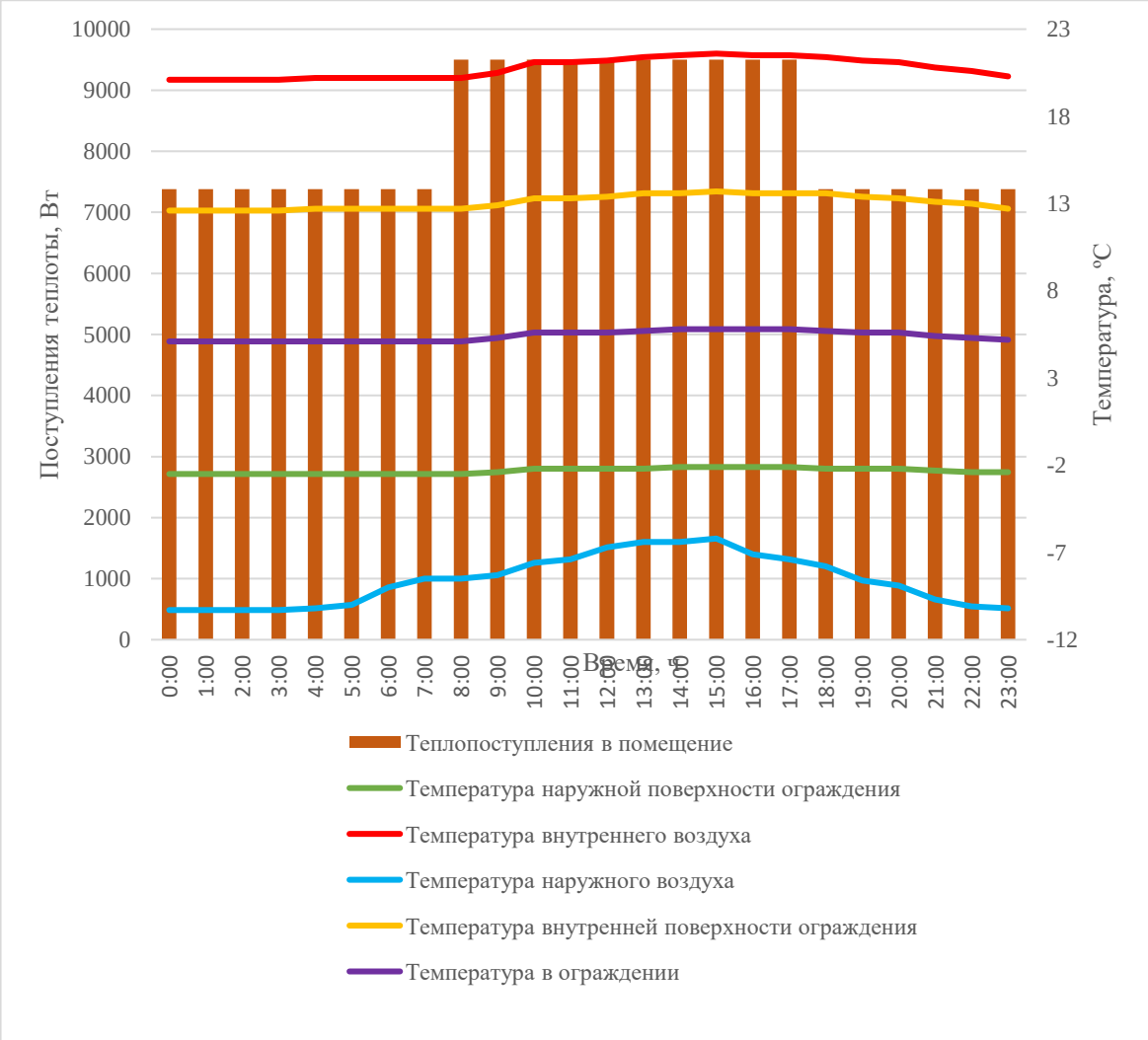


Рис. 1. Результаты математического моделирования нерегулируемых систем жизнеобеспечения

Результаты математического моделирования, произведенные для регулируемых систем обеспечения микроклимата, приведены на рис. 2. Расчеты выполнены для минимального возможного расхода энергетических ресурсов в периоды отсутствия людей и минимального необходимого расхода энергоресурсов для обеспечения комфортных условий микроклимата помещения во время проведения лабораторных занятий. Аналогично, минимально возможный расход воздуха, предотвращающий возникновений застойных зон, применяется во время отсутствия занятий в лаборатории, в остальное время система вентиляции воздуха функционирует в соответствии с нормами наружного воздуха, устанавливаемыми нормативными документами для помещений с пребывающими в них людьми [3].

Рис. 2. Результаты математического моделирования регулируемых систем жизнеобеспечения

Оптимизация режима управления системами обеспечения микроклимата привела к значительному сокращению потребления энергоресурсов. Однако оптимизация режима управления не всегда приводит к экономии ресурсов, если не выполняются минимально необходимые требования к обеспечению микроклимата помещений.

Литература

1. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.journal.esco.co.ua/2008_2/art118/art118.htm. – (Дата обращения: 05.11.2016).
2. Лысев В.И., Шилин А.С. Направления повышения энергоэффективности зданий и сооружений // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование - 2017. - № 2(26). – С. 18-25.
3. Свод правил СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная версия СНиП 41-01-2003.

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛО- И ХЛАДОТЕХНИКА

УДК: 536.2.081.7; 536.2.083

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.В. Коломийцева, А.У. Алдияров, Д.Ю. Соколов

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, НИИ экспериментальной и теоретической физики, г. Алматы, Респ. Казахстан.

alexandra.kolomiitseva@gmail.com

Аннотация

Криогенные технологии переработки и хранения сельскохозяйственной продукции становятся все более незаменимыми в пищевой промышленности, в качестве важного фактора обеспечения безопасности пищевых продуктов. Одной из таких технологий является шоковая заморозка мяса, которая обеспечивает более высокую степень сохранения качеств замороженных продуктов по сравнению с традиционными технологиями. Теплопроводность мяса является важный параметром, влияющим на потребление энергии в процессе замораживания. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования температурной зависимости теплопроводности говядины. Измерения были сделаны с использованием специально разработанной измерительной ячейки, позволяющей охватить температурный диапазон от 80 до 300 К.

Ключевые слова

Теплопроводность, замораживание, мясо.

1. Введение

Постоянно возрастающие требования к улучшению качества, биологической доступности и вкусовых качеств продуктов питания в целом и мясных продуктов, в частности, требуют разработки новых передовых технологий, их обработки и последующего хранения. Разработка и внедрение технологии заморозки пищевых продуктов является одним из важных примеров технологии, которая отвечает этим целям [1 – 3]. Несмотря на интенсивные фундаментальные и прикладные исследования в этой области за последние 40-50 лет, эта тема до сих пор остается актуальной. Это связано с тем, что в последние годы большинство исследований было сосредоточено на оптимизации процесса криообработки для достижения снижения себестоимости конечного продукта [4, 5]. Самым важным условием в этом направлении является знание механических и термических свойств замороженных продуктов, такие как плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность. Учитывая тот факт, что содержание воды в мясе колеблется от 47 до 78% [6], очевидно, что эти свойства в значительной степени определяются свойствами твердой воды, образующейся в ходе охлаждения. Хорошо известно, что [7,8] в зависимости от скорости образования твердая фаза воды, она может образовываться в виде крупных шестиугольных кристаллов (Ih), поликристаллических кубических кристаллов(Ic) и, при сверхбыстром

охлаждении (закалке), аморфное стеклообразное состояние (ASW - аморфная твердая вода). Понятно, что при замерзании воды в твердую фазу, механическое воздействие ее расширения на мышечную ткань мяса, будет в значительной степени определять степень сохранности мяса при замерзании. Кроме того, теплопроводные свойства мяса, подвергающегося замораживанию, существенно зависят от структуры льда, формируемого в межклеточном и внутриклеточном пространствах мышечной ткани [9], т.е. температуры криообработки. Знание этой информации позволит выбрать наиболее экономичный режим шоковой заморозки для достижения желаемой температуры заморозки. Такая информация особенно актуальна для выбора оптимального режима охлаждения достаточно большого количества мяса. В этом случае эффективность криообработки будет во многом зависеть от скорости перехода температурного фронта внутри охлаждаемого образца на различных этапах замораживания.

Существует множество других факторов, которые влияют на выбор оптимального режима заморозки мяса. Содержание жира, воды и другие параметры, которые в значительной степени определяют основные характеристики образцов замораживания, зависят от животноводства в регионе. Таким образом, чтобы оптимизировать процессы криообработки мяса, производство требует соответствующих термических исследований почти для каждой новой партии мяса.

2. Описание задачи и эксперимент

В данной работе представлены результаты исследования динамических характеристик процесса заморозки мяса при различных начальных температурах криообработки, а также результаты исследования теплопроводности образцов мяса в зависимости от температуры и режима заморозки. В данном исследовании особое внимание уделяется выбору режима криообработки, обеспечивающему возможность варьирования скорости охлаждения образцов до условий шоковой заморозки при максимальной скорости охлаждения образца. Предполагается, что при низких скоростях замерзания водный компонент мяса будет образовывать кристаллическую структуру (гексагональный лед), а сверхбыстрое охлаждение приведет к образованию аморфной фазы. Соответственно, динамические характеристики охлаждения и тепловые свойства этих образцов, в том числе теплопроводность, будут существенно отличаться из-за разницы в свойствах кристаллической и аморфной форм твердой воды [7, 8].

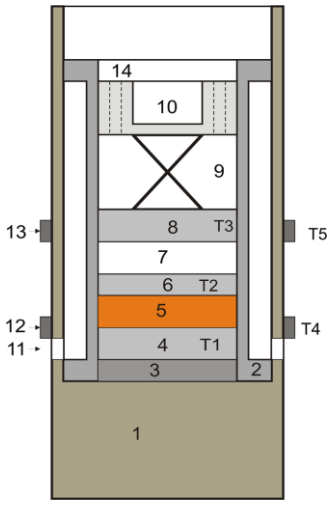


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки: 1 – внешний корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – теплообменник; 4 – нижний криостат; 5 - опорная пластина теплопроводности; 6 – измерительная пластина; 7 – тестовый образец; 8 – верхний криостат; 9 – пружина; 10 –крышка; 11 – прорезь; 12, 13 – защитное кольцо; 14 – измерительные отверстия

Целью данного исследования является определение влияния температуры замерзания на теплопроводность говядины в зависимости от скорости замерзания образца. Ниже мы опишем конструкцию устройства и метод, используемый для измерения теплопроводности образцов мяса в диапазоне температур от 100 до 300 К. Более подробное описание этого дано в работе. [9]. Мы использовали метод измерения относительной горячей пластины [8, 9]. Требуемая температура поддерживается с помощью регулятора температуры M-325 (Lakeshore, США). Измерение температуры проводится с помощью термопар DT-670B-SD и K30AWG (Lakeshore), калиброванных с помощью платинового термометра сопротивления PT-111-3S, того же производителя. Система сбора данных основана на многоканальном аналого-цифровом преобразователе, соединенном с системой обработки данных. Частота измерения составляет 10 Гц.

Принципиальная схема измерительной ячейки показана на рис. 1. Ячейка установлена на наружном корпусе 1 (стальной тип Х18Н10Т) с наружным и внутренним диаметрами 60 и 58 мм соответственно. Массивная нижняя часть корпуса 1, высотой 60 мм, выполняет функцию теплообменника между жидким азотом и измерительной ячейкой. Основные рабочие части ячейки расположены во внутреннем корпусе 2 из винилового пластика. Внутренний диаметр корпуса 2 составляет 45 мм, и все детали, вставленные в корпус 2, имеют соответствующий диаметр. Материал внутреннего корпуса подбирается таким образом, чтобы его теплопроводность не превышала теплопроводности исследуемой и эталонной пластины. Медный теплообменник 3 толщиной 8 мм встроен в нижнюю часть корпуса 2. Теплообменник 3 необходим для обеспечения теплового контакта между теплообменником 1 и измерительной ячейкой.

На верхней поверхности теплообменника 3 размещена медная пластина 4 толщиной 5 мм. Плоский 25-ваттный нихромовый нагреватель и датчик температуры DT-670B-SD типа T1 встроены в медную пластину 4 для измерения и поддержания желаемой температуры. Таким образом, пластина 4 действует как криостат для измерительной ячейки. Эталонная пластина 5 толщиной 3,06 мм изготовлена из органического стекла PLEXIGLAS XT 20070. Это используется для определения теплового потока, проходящего через измерительную ячейку [9]. На верхней поверхности эталонной пластины 5 размещена медная измерительная пластина 6 толщиной 3 мм и встроенный датчик температуры K30AWG типа T2. Измерительная пластина позволяет получать усредненные значения температуры поверхности для образцов, а также точно определять толщину эталонной пластины и испытательных образцов, независимо от размера датчиков температуры. В этом случае градиент температуры, формирующийся по толщине пластины 6, пренебрежимо мал по сравнению с градиентами температуры по эталонной пластине и образцам. Образцы для испытаний толщиной 5–7 мм помещаются между измерительной пластиной 6 и верхним криостатом 8, который представляет собой медный диск толщиной 5 мм и встроенный плоский нихромовый нагреватель мощностью 25 Вт и температурный датчик DT-670B-SD типа T3. С помощью датчиков температуры типа T1 и T3, подключенных к регулятору температуры, была задана и поддерживалась заданная разница температур между криостатами 4 и 8. Чтобы зафиксировать геометрические размеры образца во время измерения, компоненты 4–8 умеренно прессуются с помощью пружины 9 и закрепляются с помощью крышки 10. Внутренний корпус 2 с измерительными элементами 3–10 помещаются во внешний корпус 1 с внутренним диаметром 58 мм и толщиной стенки 1 мм. Для уменьшения теплового потока вдоль стенки корпуса 1 прорези 11 прорезаны в его нижней части в нижней плоскости криостата 4, образуя 6 перемычек шириной 5 мм. 6-миллиметровое пространство между корпусами 1 и 2 используется для хранения соединительных проводов и заполнено теплоизоляционным материалом. Для компенсации радиального теплового

потока в эталонной пластине и тестовом образце на внешней поверхности корпуса 1 одновременно установлены два защитных кольца 12 и 13, оснащенные датчиками температуры K30AWG типа T4 и T5, и нихромовым нагревателем мощностью 12 Вт на том же уровне как криостаты 4 и 8. Цель защитных колец 12 и 13 состоит в том, чтобы поддерживать значения температуры, установленные криостатами 4 и 8 соответственно. Образец изготовлен в виде диска диаметром около 45 мм и толщиной 5–7 мм. При подготовке образца учитывается направления мясных волокон - продольные или боковые. Отдельные измерения проводятся для каждого случая. В этом исследовании волокна мяса были ориентированы перпендикулярно пластине криостата.

Измерительная ячейка помещается вертикально в сосуд Дьюара (не показан), который затем заполняется жидким азотом до уровня 30–40 мм над нижней плоскостью теплообменника 1. При охлаждении измерительной ячейки значения температуры при контрольные точки T1 – T5 зарегистрированы. Примерно через 30–40 минут ячейка переходит в стационарный режим при заданной температуре, и проводятся измерения теплопроводности.

Описанная установка для измерения теплопроводности органических образцов использует метод относительного плоского слоя, который основан на сравнении градиентов температуры в эталонной пластине и тестовых образцах при постоянных тепловых потоках, т.е. в соответствии с законом Фурье:

$$Q = -\lambda\left(\frac{dT}{dx}\right) = -\lambda\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right) \quad (1)$$

В стационарном режиме, когда тепловые потоки через контрольную пластину и образец для испытаний равны, $Q_s = Q_x$, мы получаем:

$$\lambda_s\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta x_s}\right) = \lambda_x\left(\frac{\Delta T_x}{\Delta x_x}\right) \quad (2)$$

Переходя к введенным ранее обозначениям, коэффициент теплопроводности испытуемого образца λ_x можно выразить как:

$$\lambda_x = \lambda_r \frac{d_s}{d_x}\frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (3)$$

где T_1 – температура нижнего криостата; T_2 – температура измерительной пластины; T_3 – температура верхнего криостата; d_s – толщина эталонной пластины; d_x - толщина испытуемого образца; λ_r – коэффициент теплопроводности пластины эталона при средней температуре эталонной таблички T_r; λ_x – искомый коэффициент теплопроводности при средней температуре образца T_x.

Максимальная суммарная систематическая неопределенность при измерениях коэффициента теплопроводности составляет $\delta < 3\%$. Анализ случайной неопределенности, основанный на 11 различных измерениях на одной и той же выборке, показал, что для уровня достоверности 0,95 случайная неопределенность не превышает 4%. Таким образом, общая неопределенность в измерениях коэффициента теплопроводности составляет δ <7–8%.

Описанная установка также используется для изучения динамики замерзания образцов, то есть скорости изменения температуры по толщине образца при различных значениях температуры криостата.

Для этих исследований метод измерения и устройство были изменены. Испытуемый образец был выполнен в форме диска диаметром 45 мм и толщиной 15–18 мм. Параллельно осевой плоскости образца две термопары были вставлены на глубину

20–22 мм. Расстояние от нижней плоскости образца до первой термопары и между термопарами составляло 5 мм. Элементы 5–10 были удалены из измерительной ячейки (рис. 1), а нижний криостат 4 был охлажден до заданной температуры. При достижении температуры охлаждения образец помещали непосредственно на поверхность криостата 4, после чего поверх образца помещали пенопластовую изолирующую пластину, слегка прижатую пружиной 9 и крышкой 10. Были проведены измерения температуры образца на расстоянии 5 и 10 мм от криостата 4 с использованием автоматизированной системы сбора данных и контроллера температуры. В этом случае температура криостата поддерживалась постоянной в диапазоне от 190 до 260 К.

3. Результаты и обсуждение

Ниже демонстрируются результаты измерений изменения температуры образца мяса по всей его толщине в процессе замораживания. Целью этих экспериментов было изучение влияния температуры криообработки на динамику замораживания образца. На рис. 2 представлены результаты измерений. Здесь используются следующие обозначения: T_0 – температура криостата 4; T_1 – температура на расстоянии 5 мм от криостата; и T_2 – температура на расстояние 10 мм от поверхности криостата. Измерения проводились при трех разных температурах T_0: 190, 230 и 250 К.

Основным критерием для определения состояния образца после его замерзания в наших экспериментах является наличие или отсутствие плато на термограмме, которое указывает на процесс кристаллизации. Таким образом, отсутствие плато будет указывать на переход водосодержащего компонента мяса в аморфное (стеклообразное) состояние. Как мы уже отмечали, переход в кристаллическое или аморфное состояния при замораживании определяется скоростью замерзания [7 – 9]. В нашем случае температура криообработки является основным фактором, влияющим на скорость замерзания. Например, на рис. 2 показано, что эта температура определяет характер изменения температуры в образце.

На рис. 2а, показано изменение температуры в образце при температуре криостата T_0= 190 К. Термограммы T_1 и T_2 демонстрируют одинаковый характер изменения температуры во времени. Отсутствие плато указывает на то, что при охлаждении испытуемый образец переходит в стеклообразное состояние. Обращает на себя внимание наличие изломов на термограммах в диапазоне 260–270 К. Они указывают на ускорение скорости охлаждения образцов. Значения скорости охлаждения, рассчитанные для линейных участков термограмм, показывают почти трехкратное увеличение ниже температуры излома. Мы приписываем это наблюдение увеличению теплопроводности мяса при переходе в твердое состояние ниже термоскопической температуры, что приводит к увеличению теплообмена между криостатом и образцом.

На рис. 2б приведены данные об изменении температуры в образце при температуре криообработки T_0 = 230 К. Как видно, характер изменения температуры в исследуемых точках внутри образца принципиально отличается. Термограмма демонстрирует плавное и постепенное снижение скорости охлаждения от 0,02 до 0,01 град/с. В то же время термограмма T_2 демонстрирует плоское плато, характерное для процесса кристаллизации в интервале времени от 1200 до 1700 с. В этом случае криоскопическая температура составляет Т= 272,3 К, что согласуется с экспериментальными данными других авторов [10]. Поэтому мы приходим к выводу, что наблюдаемое различие в форме термограмм связано с недостаточно низкой температурой криообработки, которая не обеспечивает необходимую скорость охлаждения. Таким образом, на расстоянии 10 мм от поверхности криогенного воздействия происходит локализованная кристаллизация, в то время как слои, расположенные ближе к криостату, замерзают до состояния аморфного стекла (термограмма T_1). В то же время следует отметить, что скорость охлаждения образца

(термограмма T_2) выше и ниже температуры T = 272,3 K практически идентична, равна V2 = 0,02 град/с.

Экспериментальные данные, соответствующие температуре криообработки T_0= 250K, приведены на рис. 2в. Принимая во внимание характер временной зависимости термограмм T1 и T2, можно сделать вывод, что в данном режиме охлаждения кристаллизация образца проходит, по крайней мере, до расстояния 5 мм от плоскости криостата 4 по всей его толщине. Плато кристаллизации в этом случае не распознается должным образом и расширяется во времени благодаря открытости системы и пренебрежимо малому теплообмену между слоями, остающимися в разных фазовых состояниях. Кроме того, при низких градиентах температуры охлаждения разница в концентрации минеральных солей в межклеточном и внутриклеточном пространствах могут привести к различным температурам кристаллизации.

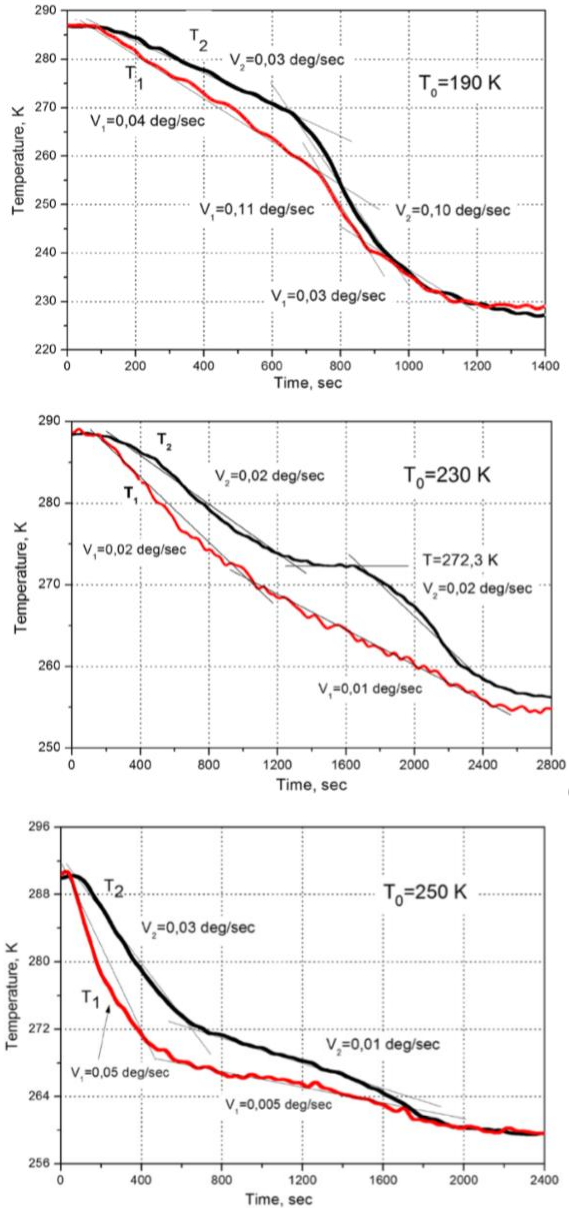


Рис. 2. Изменения температуры образцов мяса на расстояниях 5 мм от криостата 4 (T_1) и 10 мм от криостата 4 (T_2), соответствующих различным значениям температуры криообработки T_0: a – 190 K, b – 230 K, c – 250K

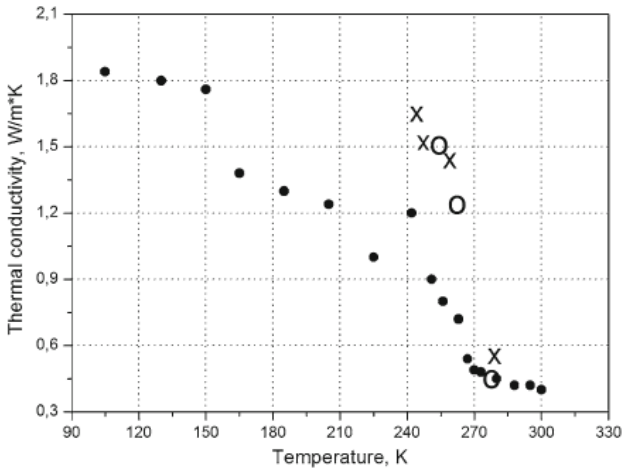


Рис. 3. Изменения теплопроводности образца биологической ткани (говядины) при замораживании: закрашенный кружок – данные в этой работе, не закрашенный кружок – данные представлены в работе [11], кресты – данные, представленные в работе [12]

Результаты измерений теплопроводности говядины при замораживании приведены на рис. 3. Данные в интервале температур от 300 до 90 К были получены следующим образом.

Начнем с задания начального значения нижнего температурного диапазона криостата 4 от T = 273 до 300 К. Затем температура верхнего криостата 8 стабилизировалась на 8–10 К выше значения выбранной температуры криостата 4. Через 20–30 минут был установлен квазистационарный режим, затем были измерены значения температур T_1, T_2 и T_3 и произведен расчет теплопроводности. Затем измерительная ячейка была несколько охлаждена до более низкой температуры (на 8–10 градусов ниже, чем предыдущее значение). Разница температур 8–10 К между криостатами 4 и 8 поддерживалась с помощью нагревателей. По достижении квазистационарного состояния значения температур T_1, T_2 и T_3 были снова измерены, и были произведены измерения коэффициента теплопроводности. Этот цикл измерения повторяли с пошаговыми изменениями температуры измерительной ячейки, пока не была достигнута самая низкая температура 90К.

Понятно, что понижение температуры приводит к резкому увеличению коэффициента теплопроводности, что связано с переходом образца в твердое состояние. Учитывая характер изменения температуры в образцах (рис. 2), можно предположить, что в интервале температур от 240 до 270 К замерзание приводит к образованию кристаллов в водосодержащей части мяса. Три точки данных, соответствующие значениям теплопроводности при температурах 150, 130 и 100 К, были получены в ходе быстрого замораживания образцов до заявленных значений. Как показано на рис. 3, эти значения выше, чем значения теплопроводности, полученные при ступенчатом оттаивании.

Результаты измерений хорошо согласуются с данными других авторов [11, 12]. Небольшое различие в значениях теплопроводности может быть связано с различием в свойствах исследуемых образцов (состав мышечной ткани и содержание воды в образцах).

4. Выводы

На основании полученных результатов, криоскопическая температура образцов говядины было определено как T = 272,3 К (рис. 2б).

Представленные здесь исследования свидетельствуют о существовании трех режимов замораживания образцов говядины в зависимости от характера температурных изменений в процессе замораживания. При температурах

криообработки ниже T = 180 K образец замерзает с переходом водосодержащего компонента мяса в квазиаморфное состояние. Об этом свидетельствует монотонный характер изменения температуры образца как выше криоскопической, так и существенно ниже ее. При температурах криообработки в окрестности T = 230 K замерзание характеризуется изменением механизма образования твердой фазы (рис. 2б). Слои мяса, расположенные ближе всего к поверхности криообработки, замерзают в квазиаморфном состоянии; однако слои мяса, более удаленные от ударной поверхности, подвергаются кристаллизации из-за более низкой скорости охлаждения (термограмма T2). Таким образом, в этих условиях образец состоит из слоев, замороженных в различные структурные состояния, как кристаллические, так и аморфные. При температурах криообработки выше T = 240 K образцы образуются в полностью кристаллическом состоянии.

Измерения температурной зависимости теплопроводности образцов мяса указывают на ступенчатое увеличение теплопроводности при охлаждении до криоскопической температуры. Дальнейшее снижение температуры приводит к монотонности увеличение коэффициента теплопроводности. Образцы, полученные в ходе шоковой заморозки, демонстрируют еще более высокие значения теплопроводности. Результаты достаточно хорошо согласуются с данными других авторов.

Литература

1. Dikeman M., Devine C., Encyclopedia Meat Sciences, 2nd edn. (Academic press, London, 2004), p.463.
2. Jeremiah E. Lester, Freezing Effect on Food Quality (Marcel Dekker, New York, 1995), pp. 61–69.
3. Marcotte M., Tahérian A., Karimi-Zindashty Y. J. Food Eng. 88(3), (2008).
4. Petrenko V., Whitworth R., Physics of Ice (Oxford University Press, New York, 1999)
5. Johari G.P., Water’s size-dependent freezing to cubic ice. J. Chem. Phys. 122, 194504 (2005).
6. Debenedetti G. Pablo, Supercooled and glassy water. J. Phys. Condens. Matter 15, R 1669–R 1726 (2003).
7. Осипова В.А., Экспериментальное исследование теплообмена (Энергия, Москва, 1979).
8. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов (Изд-во Томского политехнического университета, Томск, 2011)
9. Сергеев О.А., Метрологические основы теплофизических измерений (Изд. Стандартов, Москва, 1972).
10. Касьянов Г.И., Сязин И.Е., Криообработка (Экоинвест, Краснодар, 2014).
11. Phillipov V.I., Stepanov A.V. Rational accuracyofthe thermal characteristics ofthefoodinthe calculation of technological parameters of cold treatment. Science Magazine Science Research University RU St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics “Food Production Processes and Devices” series 1 2, 125–132 (2015).
12. R.G.M. van der Sman, Prediction of enthalpy and thermal conductivity of frozen meat and fishproducts from composition data. J. Food Eng. 84, 400–412 (2008).

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

В.В. Герасютенко[1], А.В. Шарков[1], В.А. Кораблев[1], А.В. Каялайнен[2], Д.А. Минкин[3]

1 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
2 – Государственный научный центр РФ Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Россия
3 – Санкт-Петербургский Университет Государственной Противопожарной Службы, Санкт-Петербург, Россия

viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

Аннотация
В работе исследован конвективный теплообмен в трубке из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с наружным диаметром 2 мм и внутренним диаметром 1,5мм. Для проведения исследований была разработана и собрана экспериментальная установка, состоящая из системы прокачки жидкости и измерения расхода, рабочего участка, системы электропитания и системы измерения температуры. Проведено экспериментальное исследование интенсивности теплообмена в каналах малого диаметра. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими (рассчитанными по формулам [7, 10], [8 – 11]). Построены графики зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса и коэффициента конвективного теплообмена от критерия Рейнольдса.

Ключевые слова
Конвективный теплообмен, трубы малого диаметра, теплоотдача, критерий Нуссельта, критерий Рейнольдса, терморезистор, переходный режим, турбулентный режим.

Введение

Исследование конвективного теплообмена в каналах систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является актуальной проблемой, требующей решения. Миниатюризация элементов РЭА и увеличение рассеиваемой мощности способствует уменьшению размеров систем охлаждения РЭА. В современных силовых модулях для промышленных применений уровень рассеиваемой мощности на один квадратный сантиметр площади корпуса достигает нескольких сотен ватт. Проблемы рассеивания теплоты могут быть решены с помощью применения жидкостных систем охлаждения. Основными условиями, определяющими применение той или иной системы охлаждения приборов, являются максимально допустимая рабочая температура прибора и максимальное количество теплоты, выделяемое с единицы площади поверхности прибора. Например, лазерные диоды создают тепловые потоки с плотностью более 5 кВт/см^2 при перепаде температур 30 – 40°С [1]. Для расчета параметров систем охлаждения необходимо знать интенсивность конвективного теплообмена [2 – 5]. Целью данной работы было провести исследование конвективного теплообмена в трубках с внутренним диаметром 1,5 мм. При использовании каналов малого диаметра возникает необходимость применения особо чистых жидкостей. В данной работе в качестве особо чистой жидкости применялась дистиллированная вода.

1. Экспериментальная установка для исследования конвективного теплообмена в трубах.

Была разработана и собрана экспериментальная установка для исследования теплообмена в трубах малых диаметров, схема установки представлена на рис. 1.

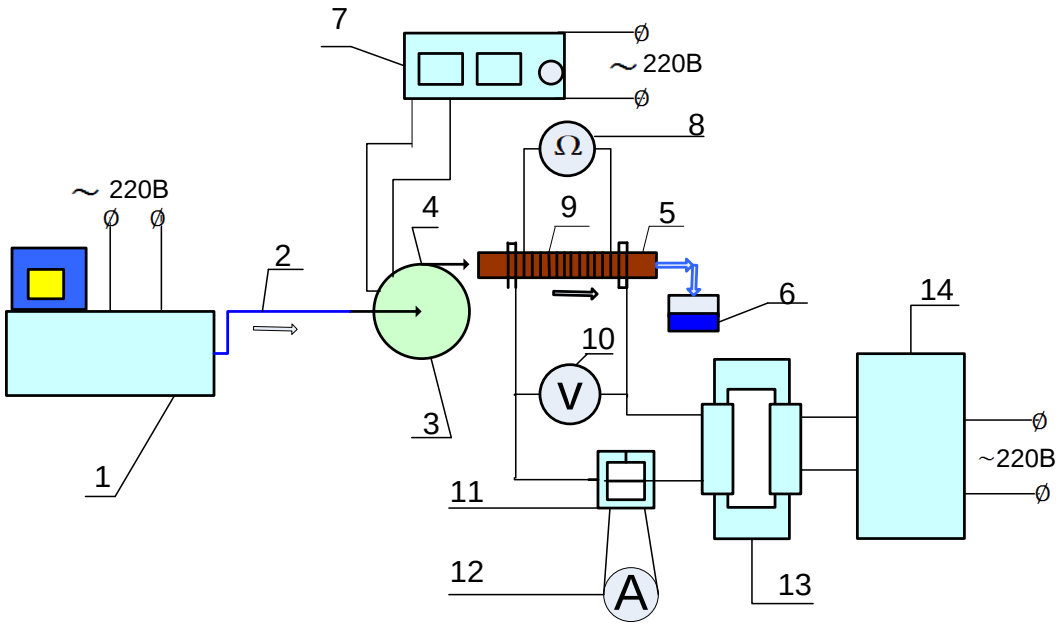


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов, обозначенных на рисунке 1 цифрами: 1 – термостат; 2 – соединительная трубка; 3 – насос; 4 – соединительная трубка; 5 – рабочий участок; 6 – измерительный цилиндр; 7 – источник питания; 8 – универсальный вольтметр для измерения электрического сопротивления; 9 – терморезистор; 10 – вольтметр, измеряющий напряжение, идущее на нагрев трубки; 11 – измерительный трансформатор; 12 – амперметр; 13 – понижающий трансформатор; 14 – ЛАТР. Дистиллированную воду заливают в термостат 1. Термостат имеет встроенную систему для внешней циркуляции. Вода прокачивается через рабочий участок 5, с помощью насоса 4 и встроенной в термостат системы прокачки жидкости. Регулировка расхода происходит посредством изменения вольт-амперной характеристики насоса с помощью источника питания 7 (рис. 1). Измерение объемного расхода жидкости происходит с помощью измерительного цилиндра 6 и секундомера. Определяется, сколько времени потребуется фиксированному объему жидкости наполнить измерительный цилиндр. Далее производится расчет объемного расхода по формуле:

$$G_v = \frac{V}{\tau},$$ где V- объем, τ- время истечения жидкости (1)

Производится градуировка объемного расхода и соответствующего ему напряжения на источнике питания, подаваемого на насос. Система электропитания рабочего участка показана на рисунке 2. Нагрев рабочего участка 5 осуществляется электрическим током. Для этого на клеммы 15 подается электрический ток. Клеммы припаяны к трубке, через которую прокачивается жидкость. Переменный ток 220В через ЛАТР 14 идет на трансформатор 13. Далее с помощью измерительного трансформатора 11 и амперметра 12 происходит измерение электрического тока. Напряжение, подаваемое на клеммы, измеряется вольтметром.

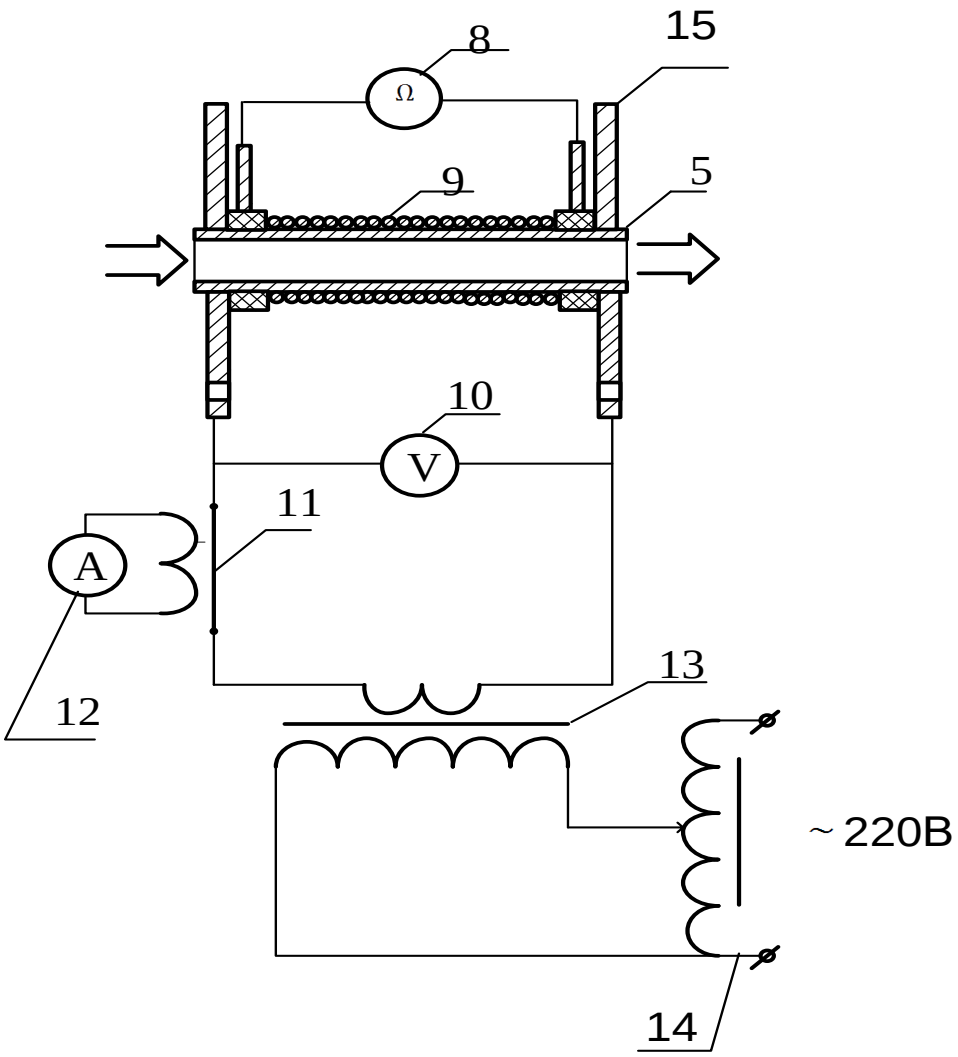


Рис. 2. Схема системы электропитания основного участка

Измерение температуры производится косвенным образом. Для этого сначала производят градуировку электрического сопротивления терморезистора 9, намотанного на трубку. Производят нагрев трубки от 30 до 95°С с помощью увеличения температуры прокачиваемой жидкости. При этом снимают соответствующее значение электрического сопротивления с помощью универсального вольтметра. После градуировки терморезистора производят нагрев рабочего участка электрическим током. Снимаются значения электрического сопротивления до нагрева и после и соответствующие этим сопротивлениям температуры.

2. Технология изготовления рабочего участка

В работе исследовалась трубка из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с наружным диаметром 2 мм и внутренним диаметром 1,5 мм. К исследуемой трубке посредством пайки прикреплены клеммы, по которым идет электрический ток. Накрутка терморезистора осуществляется вручную. Трубка укрепляется в станке и вращением его подвижной части накручивается терморезистор. Затем участок с терморезистором покрывается слоем клея. Терморезистор – это тонкая проволока, покрытая электроизоляционным лаком. После накрутки терморезистора на трубку, происходит зачистка концов терморезистора. Терморезисторная медная проволока припаивается к проволокам, находящимся на тефлоновых трубках. На проволоку, закрепленную на тефлоновых трубках, припаиваются провода, с которых снимается электрическое

сопротивление универсальным вольтметром. К терморезистору и выводам приклеивается пенопласт для уменьшения пульсации температуры на терморезисторе и уменьшения потерь тепловой энергии. Трубка через переходник и силиконовую трубку подключалась к насосу для прокачки жидкости. Измерение наружного диаметра трубки осуществляется с помощью микрометра. Измерение внутреннего диаметра трубки осуществляется с помощью микроскопа. Для этого измеряется число видимых делений под микроскопом для наружного и внутреннего диаметра трубки. Составляется пропорция и вычисляется внутренний диаметр трубки:

$$d_1 = \frac{d_2 n_1}{n_2} \quad , \tag{2}$$

где d_1 – внутренний диаметр трубки; d_2 –-наружный диаметр трубки; n_1 – число делений видимых под микроскопом для внутреннего диаметра трубки; n_2 – число делений видимых под микроскопом для наружного диаметра трубки.

3. Метод обработки результатов измерений.

Расчет коэффициента конвективного теплообмена. Электрическая мощность, идущая на нагрев трубки:

$$P = UI \quad [\text{Вт}] \tag{3}$$

Коэффициент конвективного теплообмена:

$$\alpha = \frac{P}{S\Delta t} \quad [\text{Вт/ м}^2\cdot\text{К}] \tag{4}$$

Перепад температуры между средней температурой внутренней поверхности стенки трубки и средней температурой жидкости:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{тр}} - \Delta T_{\text{ст}} - \Delta T_{\text{нагр}} \quad [\text{К}] \tag{5}$$

Перепад температуры между средней температурой трубки и средней температурой жидкости на входе в трубку:

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{\Delta \text{R}}{\text{R}_0 \alpha_э} \qquad [\text{К}] \tag{6}$$

Перепад температуры на стенке:

$$\Delta t_{\text{ст}} = \frac{q_v}{4\lambda_м}\left[2ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 - 1\right] = \bar{t}_{c2} - \bar{t}_{c1} \quad [\text{К}]\ [6] \tag{7}$$

Объемная плотность мощности:

$$q_v = \frac{P}{V} = \frac{4P}{\pi(d_2^2 - d_1^2)L} \quad [\text{Вт/м}^3] \tag{8}$$

Температура на внутренней поверхности стенки:

$$\bar{t}_{c1} = \bar{t}_{c2} - \Delta t_{\text{ст}} \quad [\text{К}] \tag{9}$$

Средняя температура жидкости:

$$\bar{t}_{ж} = t_{вх} + \frac{Ф}{2c_p G_v \rho} \text{ [К]} \quad (10)$$

Коэффициент конвективного теплообмена:

$$\alpha = \frac{Ф}{S(\bar{t}_{c2} - \bar{t}_{ж})} \text{ [Вт/ м}^2\text{·К]} \quad (11)$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (12)$$

Расчет перепада температуры между средней температурой жидкости и средней температурой на входе:

$$\Delta T_{нагр.} = \frac{P}{2c\rho G_v} \text{ [К]} \quad (13)$$

Для обработки результатов наблюдений и сравнения их с теоретическими применялась программа Scilab. Для расчета использовались формулы Михеева, Хаузена, Рамма, Кутателадзе, для теплоотдачи при движении жидкости в трубах, приведенные ниже.

Уравнение для теплоотдачи в переходном режиме движения жидкости

$$(2 \cdot 10^3 \leq Re_f \leq 10^4)\text{: [7]} \quad \overline{Nu_f} = K \cdot M \quad (14)$$

где $M = Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega}\right)^{0,25}$

Уравнение для теплоотдачи в переходном режиме движения жидкости [8]:

$$\overline{Nu_f} = 0{,}0225 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} \cdot f, \quad (15)$$

где $f = 1 - \frac{6 \cdot 10^5}{Re_f^{1,8}}$

Уравнение для теплоотдачи (для Re от 2300 и для всей области турбулентного течения жидкости) [9]:

$$\overline{Nu_f} = 0{,}12 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125\right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(\mu/\mu_{ст}\right)^{0,14} \quad (16)$$

Уравнение для турбулентного режима:

$$\overline{Nu_f} = 0{,}021 \, Re_{dж}^{0,8} Pr_ж^{0,43} \left(\frac{Pr_ж}{Pr_c}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (17)$$

где ε_l учитывает изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы [10]

Уравнение для турбулентного режима:

$$Nu_f = \frac{0{,}023 \cdot Pr \cdot Re^{0,8}}{1 + 2{,}14 Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \text{ [11]} \quad (18)$$

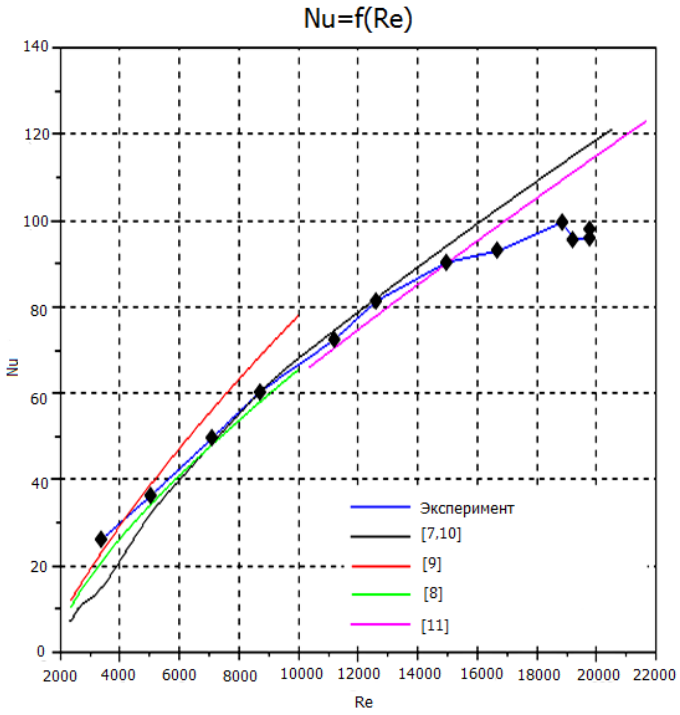


Рис. 3. График зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса Nu(Re) по данным полученным в ходе эксперимента и теоретически

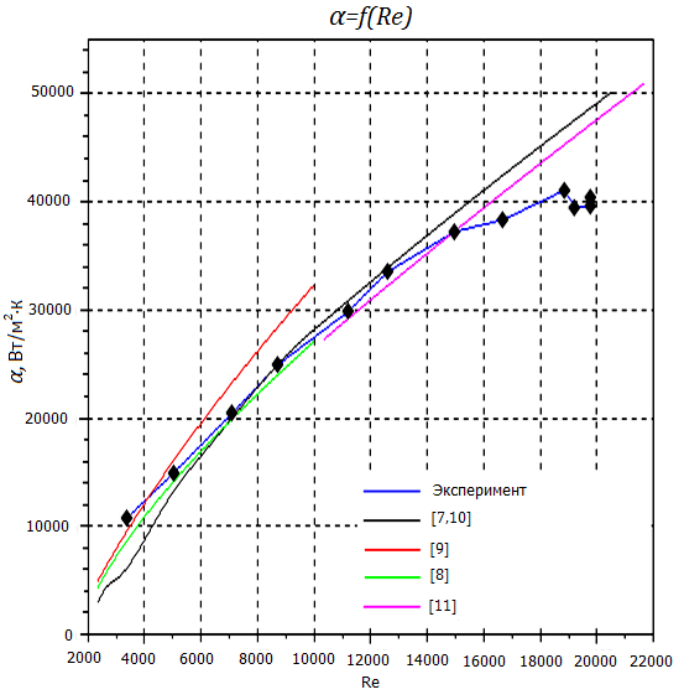


Рис. 4. График зависимости коэффициента конвективного теплообмена от критерия Рейнольдса α(Re) по данным полученным в ходе эксперимента и теоретически

Заключение

Была разработана и собрана экспериментальная установка для исследования теплообмена в трубах малых диаметров. Изготовлен рабочий участок для исследования конвективного теплообмена в трубках с внутренним диаметром 1,5 мм. Исследована интенсивность конвективного теплообмена при протекании жидкости внутри гладкой трубки круглого сечения. Проведено сопоставление графиков зависимости коэффициента конвективного теплообмена от критерия Рейнольдса α(Re) по данным

полученным в ходе эксперимента и теоретически, а также сопоставление графиков зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса Nu(Re) по данным полученным в ходе эксперимента и теоретически. Результаты экспериментов не противоречат ранее известным зависимостям.

Литература

1. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Чешев Е.А. Тепловой режим мощных лазерных диодов // Краткие сообщения по физике ФИАН. – Москва, 2015. – №3. – С. 36 – 43.
2. Кадирова Д.К. Использование микроканальных теплообменных систем для обеспечения тепловых режимов // Сборник материалов XXXVIII итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов Дагестанского государственного технического университета. – Дагестанский государственный технический университет (Махачкала), 2017. – С. 35 – 37.
3. Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Дроздов И.Г. Моделирование процессов тепломассопереноса в микроканальных теплообменниках систем управления космической техники // Вестник Сибирского Государственного Аэрокосмического Университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2016. – Том 17, №1 – С. 137-146.
4. Беляев А.В., Варавва А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т., Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в каналах малого диаметра при высоких приведенных давлениях // Сборник научных трудов: Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск, 2012. – С. 24 – 27.
5. Малаховский С.А., Варавва А.Н., Дедов А.В., Захаров Е.М., Комов А.Т. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в каналах малого диаметра //Вестник Московского Энергетического Института. – Москва, 2007. - №1. – С. 51 – 56.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Издание 4-е перераб. и дополненное. – М.: "Энергоиздат", 1981. – 415 с. Учебник для технических специальностей высших учебных заведений.
7. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – «Энергия», Л., 1968. – 354 с.
8. Андреев В.А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. Основы расчета и проектирования. – Л. «Энергия», 1971. – 152с.
9. Тарасов Ф.М. Тонкослойные теплообменные аппараты. – М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 364 с.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: ООО «ИД БАСТЕТ», 2010. – 344 с.: ил.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена: Издание 5-е, переработанное и дополненное. – Москва: Атомиздат, 1979. – 416 с.

УДК 538.953-405

ХОЛОДИЛЬНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРЧИЕСКИЙ МОДУЛЬ С СИЛИКОНОВЫМИ КОНТАКТАМИ

А.А. Касьянов[1,2], Г.Н. Исаченко[2,3], К.Л. Самусевич[2,3]

1 – ООО «Криотерм», Санкт-Петербург, Россия
2 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
3 – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

kas.43@mail.ru

Аннотация
Использование в p- и n-ветвях материалов с различными коэффициентами теплового расширения может вызвать определённые проблемы при эксплуатации термоэлектрического модуля. В работе описан процесс сборки экспериментального модуля с демпфирующим холодным спаем на n-ветвях термоэлектрических элементов и сравнение его характеристик с промышленным модулем.

Ключевые слова
Термоэлектричество, термоэлектрический модуль, силициды, электропроводный силикон, коэффициент теплового расширения.

Введение

На данный момент использование в термоэлектричестве таких материалов, как теллуриды, является довольно распространённым и надёжным. В то же время материалы этой группы практически не представляют научного интереса и развития, поскольку являются практически целиком изученными. Материалы такой группы, как силициды, имеют для этого гораздо больший потенциал. Также стоимость, токсичность и масса силицидов меньше, чем у теллуридов, а их большая доступность и высокая термоэлектрическая эффективность являются значительным преимуществом этой группы материалов [1 – 3].

На сегодняшний день большинство высокопроизводительных силицидных термоэлектриков основаны на твёрдых растворах $Mg_2(Si\text{-}Sn)$ и имеют n-тип проводимости с ZT до 1,5 [4 – 7]. Из известных силицидов p-типа проводимости наиболее эффективными являются силициды манганита, имеющие пиковые значения ZT от 0,6 до 0,8 [8]. Одной из главных проблем соединения этих материалов в пары ТЭЭ является разный коэффициент теплового расширения (далее - КТР) материалов. КТР для материала n-типа $Mg_2(Si\text{-}Sn)$ равен 16-18 10^{-6} K^{-1}, в то время как для материала p-типа КТР равен 9-13 10^{-6} K^{-1} [9 – 10]. Подобная разница неизбежно приводит к нарастанию напряжения в результате большого температурного градиента между горячей и холодной сторонами ТЭМ, что в свою очередь может привести к разрушению ТЭЭ. Этот эффект особенно наблюдается у ТЭЭ n-типа на горячих спаях [11]. В качестве решения проблемы проводились попытки сборки ТЭМ только на ТЭЭ n-типа Mg_2Si. Подобные ТЭМ демонстрировали хорошую стабильность и надёжность, но при этом имели довольно низкую эффективность при мощности на единицу площади около 22 Вт/см^2 при разности температур 500 °C. Также проводились попытки сборки ТЭМ с использованием пружинных контактов на холодных спаях, которые смягчали влияние несоответствия между p- и n-ветвями с разными КТР [12].

Подготовка материала

Материал ТЭЭ, используемый в работе, получен методом синтеза. Размер ветвей ТЭЭ - 2,0х2,0х1,5 мм. Керамические пластины 96% Al_2O_3 размером 30х30х0,89. Для сборки использовалась паяльная паста SnSb с $T_{пл.}$ = 139 °С. В качестве демпфирующего соединения использовался электропроводный силикон EX-A302L с удельным сопротивлением 0,02 Ом/см, плотность 3,7 г/см^3, теплопроводность 2,1 Вт/(м·К).

Конструкция и сборка ТЭМ

За основу было решено взять стандартный ТЭМ производства ООО "Криотерм" ТВ-31-2.0-1.5, размерами 30х30х4,8 мм, по причине большого размера ветвей ТЭЭ, что упрощает процесс сборки и уменьшает вероятность брака. На металлизированные керамические пластины были припаяны коммутационные медные шины, после чего, посредством специализированной оснастки, на "горячую" керамическую пластину с шинами припаяли заранее набитую по коммутационной схеме цепь ветвей ТЭЭ. Получилась заготовка в виде «ёжика», без «холодной» пластины, изображённая на рис. 1. Затем через квадратные отверстия в трафаретах, расположенных в шахматном порядке, на специальном принтере нанесли на поверхность ветвей ТЭЭ p- типа «ёжика» паяльную пасту. На ответную заготовку «холодной» керамической пластины через квадратные отверстия трафарета нанесли электропроводный силикон таким образом, чтобы при совмещении с «ёжиком» силикон контактировал с ветвями ТЭЭ n-типа, (рис. 2). Далее две заготовки совместили в специальной силиконовой оснастке и провели через цикл нагрева конвейерной печи с максимальной $T_{пл.}$ = 260°С. После этого ТЭМ подвергся шлифованию на плоскошлифовальном станке для достижения плоскостности контактных поверхностей 20 мкм и параллельности между поверхностями 30 мкм.

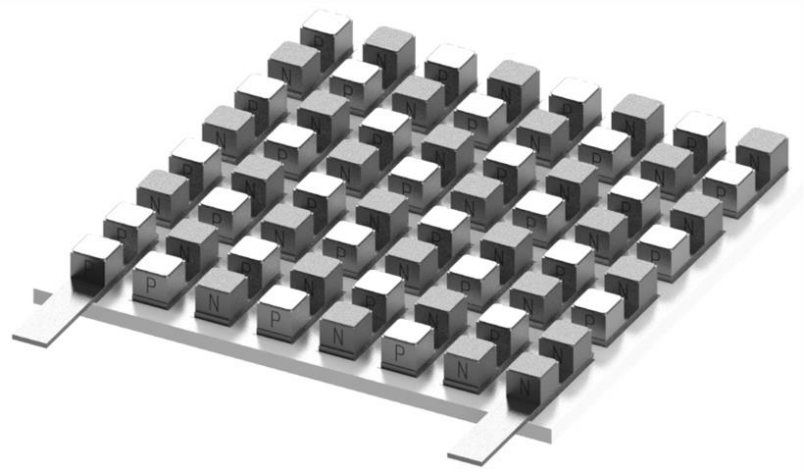


Рис. 1. Промежуточная стадия изготовления термоэлектрического модуля

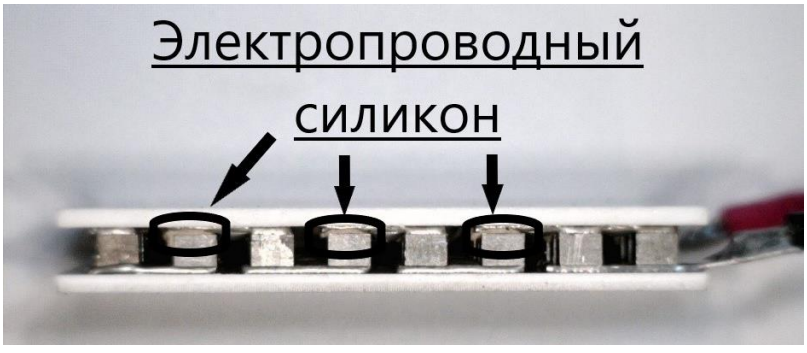


Рис. 2. Термоэлектрический модуль с электропроводным силиконом на холодных спаях

Испытания ТЭМ

После сборки и шлифовки был проведён ряд сравнительных испытаний экспериментального и стандартно ТЭМ ТВ-31-2.0-1.5 на измерительных установках собственного производства ООО «Криотерм».

Оба ТЭМ подвергли испытанию на температурное циклирование, что подразумевает собой включение и выключение ТЭМ до рабочего состояния в течение 1000 циклов. После измерений на производительности оба ТЭМ проверили на тепловизоре, где подтвердилась работоспособность экспериментального термоэлектрического модуля. Результаты испытаний промышленного и экспериментального модулей приведены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний промышленного и экспериментального ТЭМ.

Параметры	ТВ-31-2.0-1.5 Стандартный	ТВ-31-2.0-1.5 Экспериментальный
Ток нагрузки $I_{нагр.}$, А	0,69	0,69
Напряжение нагрузки $U_{нагр.}$, В	20	20
Сопротивление R, Ом	0,23	0,23
Мощность нагрузки $Q_{нагр.}$, Вт	0,12	0,12
Температура «горячей» стороны ТЭМ $T_{гор.}$, °С	27,03	26,85
Температура «холодной» стороны ТЭМ $T_{хол.}$, °С	-42,22	-34,95
Максимальная разница температур «горячей» и «холодной» стороны при температуре 27 °С $\Delta T_{max\ 27}$, °С	69,24	61,86
Максимальная холодильная мощность Q_{max}, Вт	28,3	24,5

Выводы

Из полученных характеристик можно сделать вывод, что мощность и разница температур экспериментального ТЭМ не превышает 10%, из чего можно сделать вывод, что эксперимент прошёл успешно, а конструкция ТЭМ с электропроводным силиконом является работоспособной. Подобную конструкцию ТЭМ можно использовать для изготовления модулей с более эффективными термоэлементами, имеющими различные коэффициенты теплового расширения.

Литература

1. Amatya R., Ram R.J., Trend for Thermoelectric Materials and Their Earth Abundance // Journal of Electronic Materials. – 2012. – № 41. – С. 1011–1019.
2. LeBlanc S., Yee S.K., Scullin M.L., Dames C., Goodson K.E., Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 32. – С. 313–327.
3. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q., A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2014. – № 32 – С. 486–503.
4. Zaitsev V.K., Fedorov M.I., Gurieva E.A., Eremin I.S., Konstantinov P.P., Samunin A.Y., Vedernikov M.V. Highly effective $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ thermoelectrics // Physical

Review B. – 2006. № 74. – С. 045207.
5. Bashir M.B.A., Said S. Mohd, Sabri M.F.M., Shnawah D.A., Elsheikh M.H., Recent advances on $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ materials for thermoelectric generation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. –№ 32. - С. 569–584.
6. Gao P., Berkun I., Schmidt R., Luzenski M., Lu X., Bordon Sarac P., Case E., Hogan T.J. Transport and Mechanical Properties of High-ZT $Mg_{2.08}Si_{0.4-xSn0.}6Sb_x$ Thermoelectric Materials // Journal of Electronic Materials. – 2014. – № 43. – С. 1790–1803.
7. Khan A.U., Vlachos N.V., Hatzikraniotis E., Polymeris G.S., Lioutas C.B., Stefanaki E.C., Paraskevopoulos K.M., Giapintzakis I., Kyratsi T. Thermoelectric properties of highly efficient Bi-doped $Mg_2Si_{1-x-y}Sn_xGe_y$ materials // Acta Materialia. – 2014. – № 77 – . 43–53.
8. Fedorov M.I. Thermoelectric silicides: past, present and future // Journal of Thermoelectricity. – 2009. – № 2 – С. 51–60.
9. Engstrom I., Lonnberg B. Thermal expansion studies of the group IV-VII transition-metal disilicides // Journal of Applied Physics. – 1988. – № 63. – С. 4476-4484.
10. Gelbstein Y., Tunbridge J., Dixon R., Reece M., Ning H., Gilchrist R., Summers R., Agote I., Lagos M.A., Simpson K., Rouaud C., Feulner P., Rivera S., Torrecillas R., Husband M., Crossley J., Robinson I. Physical, Mechanical, and Structural Properties of Highly Efficient Nanostructured n- and p-Silicides for Practical Thermoelectric Applications // Journal of Electronic Materials. – 2014. – № 43. – С. 1703-1711.
11. Bourgois J., Tobola J., Chaput L., Zwolenski P., Berthebaud D., Gascoin F., Recour Q., Scherrer H., Study of electron, phonon and crystal stability versus thermoelectric properties in Mg2X(X = Si, Sn) compounds and their alloys // Functional Materials Letters. – 2013. – №. 6. – С. 1340005.
12. Skomedal G., Holmgren L., Middleton H., Eremin I.S., Isachenko G.N., Jaegle M., Tarantik K., Vlachos N., Manoli M., Kyratsi T., Berthebaud D., Truong N.Y.D., Gascoin F. Design, assembly and characterization of silicide-based thermoelectric modules // Energy Conversion and Management 2016. – № 110. – С. 13-21.

УДК 637.52.001.8

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕХАНИЗМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ СЫРОВ

И.В. Буянова[1], Г.В. Гуринович[1], А.М. Таева[2], М.В. Котлярова[1]

1 – Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия
2 – Алматинский технологический университет, г. Алматы, Респ. Казахстан

ibuyanova_@mail.ru

Аннотация
Данная работа посвящена научному и теоретическому обоснованию технологии замораживания и холодильного хранения полутвердых сыров в области низких температур. Рассматриваются вопросы по увеличению сроков годности пищевых продуктов на базе принципов холодильной технологии. Замораживание приводится как эффективный способ вымораживания воды. Рассматриваются закономерности и физико- химическая сущность фазового перехода воды в лед. Сыры изучаются, как объекты замораживания с приведением теоретических результатов по механизму модельного замерзания пищевых продуктов. Приводятся сведения, характеризующие состав и свойства сыров с позиции регулирования действия замораживания. Проводится анализ влияния низких температур на характер вымерзания воды из сыров с учетом компонентного состава и состояния воды. Научно обоснованы режимы холодильной обработки головок или блоков сыра стандартных размеров с использованием плиточного скороморозильного аппарата при оптимальных режимах минус 40 ÷ минус 42 °С до среднеобъемной температуры замерзания минус 20ºС. Результаты указали на основную завершенность льдообразования при замораживании до температур продукта на уровне − 30… – 40 °С. С учетом требований к полному восстановлению свойств сыров после оттаивания рекомендуемые режимы: средняя скорость замораживания $(5,6–6,0)\cdot10^{-6}$ м/с, толщина поперечного сечения сыра 0,14–0,17 м, время замораживания 6,2–7 часов.

Ключевые слова
Полутвердые блочные сыры, замораживание, низкие температуры, гидрофильность, вымороженная вода, сроки годности, механизм замораживания.

Введение

Сыр занимает особое место среди молочных продуктов по своим диетическим свойствам. Технология его изготовления позволила концентрировать представляющие наибольшую ценность жировую и белковую части молока, а затем месяцами и даже годами сохранять этот концентрат. Можно считать, что сыр был одним из первых консервированных продуктов, который сохранялся и использовался не только в домашних условиях, но и в военных походах, путешествиях. Много столетий назад люди использовали замораживание в качестве одного из методов его консервирования и длительного хранения [1].

В настоящее время существует ряд направлений по увеличению стойкости сыров во время хранения. Использование озонирования воздуха в камерах хранения, применение современных упаковочных материалов или защитных покрытий, ультрафиолетовое и ионизирующее облучение продуктов и другие не решают в полной мере вопроса по сохранению высокого качества сыров в течение года и более. Одним из доступных факторов продления сроков хранения, является замораживание, которое

позволяет в большей степени снизить интенсивность микробиологических и биохимических реакций порчи, протекающих в продукте, повышая тем самым пригодность продукта в хранении.

Вопросам совершенствования технологии хранения пищевых продуктов и сыров, в частности, посвящены труды многих отечественных ученых: С.А. Большакова, Н.А. Головкина, А.В. Гудкова, З.Х. Диланяна, П.Ф. Крашенинина, А.М. Маслова, Л.А. Остроумова, Р.И.Раманаускаса, Г.Б.Чижова и др.

Современные рекомендуемые режимы хранения сводятся к субкриоскопическим температурам, которые не могут обеспечить продолжительное хранение, особенно для тех видов сыров, для которых гарантийные сроки ограничены 0,5–2 месяцами. Существующие способы продления сроков хранения не позволяют существенно сохранить качество в течение продолжительного времени. Многообразие используемых технологий за рубежом и в нашей стране является основанием для продолжения исследований в области холодильной технологии применительно к отечественным видам сыров с целью управления технологическими процессами их хранения

В решении этой задачи следует стремиться сохранить максимально все свойства свежего продукта: и внешний вид, и вкусовые, и питательные свойства. Данное научное направление и результаты исследования по совершенствованию режимов длительного хранения дают основания считать использование области низких температур для холодильного хранения сыров приемлемым подходом. Кроме того, российский рынок сыра расширяется, объемы производства увеличиваются и в перспективе наметились тенденции на сокращение импорта за счет увеличения собственных производств.

В настоящее время недостаточно аналитического материала по холодильной обработки и низкотемпературному хранению сыров. В связи с этим, многообразие их видов и сложность отвечающих им закономерностей предопределяют экспериментальный путь установления связи между качеством продукта при длительном хранении и факторами, от которых они зависят.

Данная работа посвящена научному и теоретическому обоснованию технологии замораживания и холодильного хранения полутвердых сыров в области низких температур.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований служили натуральные полутвердые сычужные сыры различной степени зрелости. Рассматривали два основных подкласса сыров – сыры с высокой и низкой температурой второго нагревания, которые пользуются наибольшей популярностью у потребителей такие как: «Советский», «Российский», «Голландский», «Пошехонский», «Костромской», «Ярославский»и др. Советский блочный сыр имел прямоугольную форму длиной 48 см, шириной 18 см и высотой 15 см. Российский сыр имел форму низкого цилиндра со слегка выпуклыми боковыми поверхностями, диаметром 35 см и высотой 16 см.

Для предприятий отрасли технологически целесообразно замораживать сыры в стандартных формах, без их порционирования.

Тип морозильного оборудования для замораживания экспериментальных образцов головок или блоков сыра выбирали, предварительно рассчитав по известным зависимостям продолжительность замораживания, чтобы иметь первое представление о приемлемости данной технологической операции в условиях реального производства. Для определения режимных параметров процесса разработан и создан экспериментальный стенд, плиточного типа принципиальная схема которого показана на рис. 1.

Морозильные плиты изготовлены из листового алюминия толщиной 4 мм, внутри которых по специальным каналам циркулирует хладон 22. Перемещает плиту

гидравлический механизм 6, необходимый для подпрессовки замораживаемого блока 9 давлением до 30 кПа. Холодоснабжение осуществляет двухступенчатая холодильная машина, работающая на температуру кипения минус 43°С.

При выполнении работы использовали общепринятые и оригинальные методы исследований: физико- химические, биохимические, микробиологические.

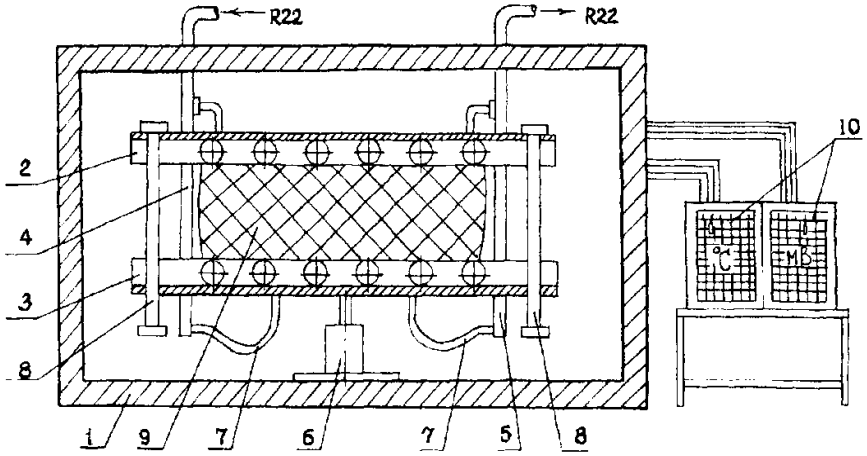


Рис. 1. Схема экспериментального стенда плиточного морозильного аппарата: 1 – насос вакуумный; 2 – камера вакуумная; 3 – конденсатор; 4 – компрессор; 5 – отделитель жидкости; 6 – ресивер; 7 – десублиматор; 8 – вакумметр; 9 – терморегулирующий вентиль

Результаты и их обсуждение

Кинетика процесса замораживания определяется количеством вымерзаемой влаги. Температурные режимы замораживания, обусловливая соотношение между полным содержанием воды и количеством вымороженной, регулируют скорость протекания биохимических и ферментативных реакций в сырах, определяя устойчивость их в хранении [2, 3].

Для того чтобы снизить физико-химические изменения, происходящие в продукте при низкотемпературном хранении, следует водную фазу сыров максимально перевести в кристаллическое состояние. Незамерзшая часть воды представляет собой концентрированный раствор органических солей и кислот, которая может явиться причиной изменений в продукте при хранении. Для получения высокой степени обратимости белков структурно связанная вода должна остаться без изменения в замороженном сыре. В этом случае стойкость белка обусловлена защитной незамерзающей водной оболочкой и, следовательно, отсутствием причины для изменения агрегатного состояния белковой матрицы сыра. Учеными сыр рассматривается, как пространственных структурная сетка нерастворимых белковых макромолекул с отверстиями 40–80 мкм. В ее свободных ячейках равномерно распределен молочный жир и влага [1].

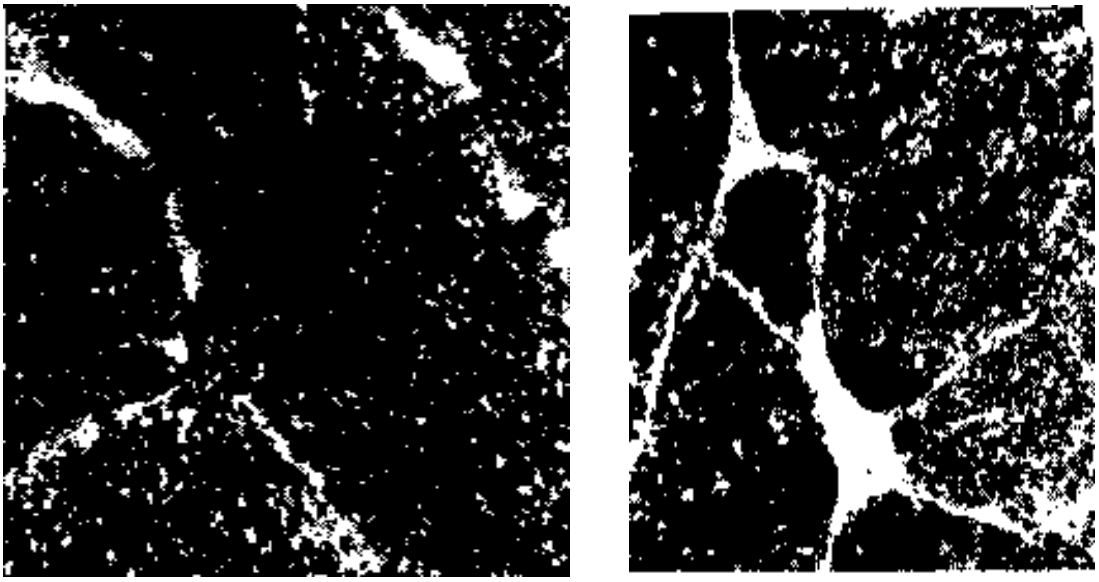
Жировые капли на своей поверхности не имеют белково–липоидных оболочек и до 90 % жира в твердых сырах находится в дестабилизированном состоянии [1].

Вода расположена в прослойках между макрозернами белка, в микропустотках. Средняя толщина прослоек у различных сыров колеблется в пределах 6–36 мкм. В корковом слое она несколько меньше (на 1,5–4,5 мкм), чем в центральных участках сыр.

Характер связи влаги с компонентами сыра можно объяснить его весьма сложной микроструктурой. Структурная модель различных сыров приведена на рис. 2. Изучение показало, что составные части продукта обладают гидрофильными свойствами и прочно связывают воду. Каждый вид сыра отличается своей

влагоудерживающей способностью. Такой характер связи воды с сухим веществом сыра отличается природой и величиной энергии (прочностью) связи.

Анализ физико–химических модификаций состояния воды в сырах указывает, что на данном этапе по состоянию изученности вопроса, очевидно, следует перейти к рассмотрению поведения воды в условиях низких температур, как главного фактора холодильной обработки хранения.



A B

Рис. 2. Микрофотографии структуры сыров (увеличение в 60 раз):
А – советского; В – российского

Возможность технологического использования замораживания связано с совместно протекающими явлениями – понижением температуры продукта ниже криоскопической и сопровождаемым льдообразованием.

В ходе замораживания объектов исследования механизм замерзания воды в пищевых продуктах на модели ячейкообразных тел по исследованиям Ю. Хаяси, С. Като, К. Хаттори приведен графически (рис. 3). Так, группы ячеек А и В соответствовали внутриклеточным и внеклеточным моделям структуры пищевого продукта, которые определяют различный состав водных растворов в них.

Растворенные вещества выделяются и диффундируют в незамерзшую часть раствора, повышая, таким образом, его концентрацию. По мере вымораживания воды остаточная концентрация (C_i) раствора возрастает и температура замерзания (Т) еще более понижается. Кривая замерзания показывает зависимость концентрации водных растворов от температуры замерзания. Внутри ячеек замерзание идет в соответствии с понижением точек затвердевания (на рисунке штрих–пунктирные линии) и в момент, когда концентрированный раствор достигает эвтектической точки, наступает полностью твердая фаза, при которой растворенное вещество и лед разделены между собой. Застывание в сплошную твердую массу происходит при достижении определенной для данного раствора (водная фаза) концентрации – эвтектической (C_A'') [3].

Таким образом, на рис. 3 показана схема состояния замерзания в области совместного существования твердой и жидкой фаз, распределения концентрации растворенного вещества в еще незамерзшей части отдельных ячеек (жирная линия). Если в одной группе ячеек вода до конца не замерзла, то в соседней области процесс замерзания продолжается. В результате чего возникают области совместного

существования твердой и жидкой фаз, заканчивающиеся у границ температуры эвтектики. Стенки ячеек регулируют переохлаждение и вызывают ступенчатое замерзание.

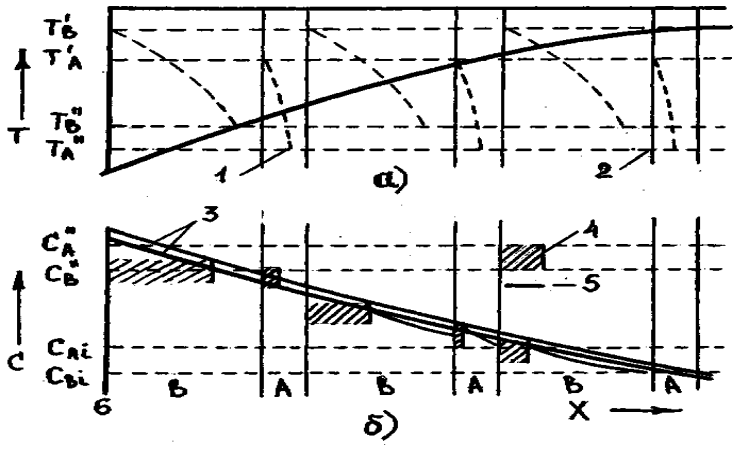


Рис. 3. Схема модельного замерзания пищевых продуктов:
1 – температура замерзания; 2 – стенка ячейки; 3 – равновесная концентрация;
4 – замерзшая часть; 5 – концентрация; 6 – ячейки

Проведенное фундаментальное исследование замораживания пищевых продуктов учеными многих стран позволило углубить познания в этой области и выяснить механизм замерзания. Проведенный анализ компонентного состава сыра, его микроструктуры, а также состояния и свойств воды, дает возможность рассматривать этот молочный продукт как хороший объект для холодильной обработки.

Критерием эффективности в наших исследованиях установлена продолжительность замораживания до достижения конечной температуры в центре блока сыра минус 20°С. Исследуемыми факторами явились: температура морозильной плиты X_1 в диапазоне от − 30°С до − 50°С. Получены закономерности изменения температурного поля продукта при замораживании. Анализ термограмм показал, что снижение температуры во время замораживания и кристаллообразование по слоям бруска сыра проходит по стадийно. Относительно большой размер поперечного сечения блока Советского сыра увеличивает продолжительность прохождения фронта кристаллизации в среднем и центральном слоях до его термического центра. Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод, что продолжительность процесса зависит в большей степени от толщины блока сыра.

Из результатов исследований следует, что продолжительность замораживания увеличивается пропорционально росту геометрических размеров головок сыра. Так, при толщине блока 0,08 м и температуре морозильной плиты − 40ºС длительность процесса составляла около 5 часов. Крупные сыры, имеющие размеры в поперечном сечение 0,2 м замораживали в течение 10 часов.

Использование температуры плиты − 30ºС при тех же остальных факторах привело к увеличению продолжительности замораживания до 7 часов при толщине блока 0,08 м и до 13 часов при толщине блока 0,2 м.

Установили, что для максимального сохранения исходных свойств продукта в процессе хранения важно обеспечить высокую скорость замораживания. Низкие температуры плиты не дают существенного увеличения скорости процесса и, соответственно, сокращения его продолжительности, но приводят к значительному повышению энергетических затрат, о чем свидетельствуют результаты термоэкономического анализа, проведенного по известной методике. Поэтому с

экономической точки зрения для проведения замораживания сыров не следует понижать температуру морозильной плиты ниже – 40°С.

Установили закономерности и технологический регламент замораживания головок (блоков) полутвердых сычужных сыров. Оптимальные условия замораживания следующие: температура морозильной плиты – 40°С, конечная температура в термическом центре головки сыра – 20°С, средняя скорость замораживания $(5{,}6–6{,}0)\cdot10^{-6}$ м/с, толщина поперечного сечения сыра 0,14–0,17 м, время замораживания 6,2–7 часов.

Литература

1. Гудков А.В., Сыроделие: технологические, биологические и физико- химические аспекты. – М.: ДеЛи принт, 2003. –800 с.
2. Головкин Н.А., Холодильная технология пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. –240 с.
3. Хаяси Ю., Като С., Хаттори К., Фундаментальные исследования замерзании пищевых продуктов / Хаяси Ю., // Нихон кикай гаккай ромбунсю. – 1981.– Вып. 47. – № 414.– С. 361–367.

УДК 536.2, 538.93

СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВИСМУТА И СУРЬМЫ

Е.С. Макарова[1], Н.С. Каблукова[2,3], А.В. Новотельнова[1], А.В. Асач[1], И.Л. Тхоржевский[1], В.Е. Фомин[1]

1 – Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
2 – Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия
3 – Университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

E-mail:makarova_helena_2011@mail.ru

Аннотация
Проведено исследование гальваномагнитных свойств однослойных пленок висмута и пленок висмута с ультратонким слоем Sb толщиной 10 нм, используемого в качестве подслоя. В этой статье представлено исследование влияния ультратонкого слоя сурьмы на гальваномагнитные свойства и структуру мелкозернистых, отожженных и монокристаллических пленок.

Ключевые слова
Удельное сопротивление, магнетосопротивление, коэффициент Холла, теплопроводность, температуропроводность.

Введение

В настоящее время идет расширенный поиск термоэлектрических материалов и различных методов, дающих возможность увеличить показатель коэффициента термоэлектрической добротности ZT, определяемый формулой (1):

$$ZT = \frac{\sigma S^2}{\kappa} T, \quad (1)$$

где α-коэффициент Зеебека, σ – электропроводность материала, к – коэффициент теплопроводности материала.

Существует два способа увеличения коэффициента термоэлектрической добротности (ZT). Первый способ заключается в создании новых термоэлектрических материалов. Второй способ заключается в миниатюризации материалов, и переходу к низкоразмерным объектам. При переходе от массивных кристаллов к низкоразмерным объектам, например к пленкам, происходит изменение физических свойств материала, связанное с размерными эффектами и структурой тонких пленок. При этом этот путь развития термоэлектрического материаловедения существенно затруднен полным отсутствием достоверных данных о свойствах термоэлектрических материалов, получаемых в виде тонких пленок. Чередуя тонкие слои термоэлектрических материалов, существует возможность уменьшить коэффициент теплопроводности, при этом оставляя высокие значения электропроводности.

Технологии и методы получения тонких пленок висмута

Висмут и сурьма являются низкотемпературными термоэлектрическими материалами. С помощью различных методов можно получать пленки висмута и сурьмы, обладающие структурой от монокристаллической до мелкозернистой.

Наиболее оптимальной технологией получения тонких пленок висмута и сурьмы является термическое испарение в вакууме.

Для исследования были получены пленки на установке, имеющий рабочий вакуум 10^{-5}Torr. Было изучено несколько групп пленок (таблица). Для получения пленок висмута применялся дискретный метод напыления. Пленки висмута с подслоем сурьмы получали следующим образом: подслой сурьмы наносили на подложку, имеющую температуру 150°С, а затем подложку охлаждали до температуры, соответствующей температурному режиму следующего этап технологического цикла. Затем производили напыление слой висмута. Температурные режимы, соответствующие получению различных структур пленок, указаны в таблице.

Таблица

Режимы получения тонких пленок висмута

Структура пленки	Температура подложки, °С	Температура отжига, °С	Зонная плавка
Мелкозернистая	20	-	-
Отожженная	120	250	-
Монокристаллическая	20	-	+

Для получения монокристаллической пленки, на мелкозернистую пленку наносилось дополнительное защитное покрытие из KBr. Затем полученную заготовку помещали в установку для зонной перекристаллизации, где выращивали пленочный монокристалл.

Были выбраны для исследования две подложки: слюда и полиимид. Слюда и полиимид оказывают разное воздействие на структуру пленки в процессе ее роста. Также данные подложки обладают разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКР) ($\alpha_{слюда}<\alpha_{Bi}<\alpha_{полиимид}$). Данное различие ТКР материалов подложки и пленки с изменением температуры приводит к различным деформациям (растяжению и сжатию) [1].

Экспериментальные результаты

Исследование структуры. При исследовании структуры были получены рентгенограммы пленок и для сравнения рентгенограмма плоскости скола монокристалла висмута (111) (рис. 1). Перекристаллизованные пленки являются монокристаллическими. Хорошее разрешение максимума 5-ого порядка K_α линий меди свидетельствует о хорошей кристаллической структуре образца. Форма пика для пленок повторяет форму пика для кристалла соответствующей ориентации (C_3 параллельной нормали плоскости пленки). Максимум пятого порядка хорошо разрешается и не смещается в сторону больших углов. Это свидетельствует о том, что сурьма не растворилась в объеме висмута, так как уже при малых концентрациях твердого раствора висмут-сурьма происходит изменение параметра кристаллической решетки, и максимум 5-ого порядка смещается в сторону больших углов.

Для отожженных пленок максимум 5-го порядка хорошо разрешается и не смещается в сторону больших углов. Это свидетельствует о том, что в полученных пленках у всех кристаллитов ось C_3 ориентирована параллельно нормали подложки и пленки на подслое сурьмы остаются двухслойными. Во время термической обработки пленки (отжиг или зонная перекристаллизация под покрытием) подслой сурьмы не растворяется в объеме висмута, и пленка остается двухслойной.

Мелкозернистые пленки исследовались аналогичным методом. В их рентгенограммах наблюдаются характерные для висмута максимумы, но отсутствует максимум 5-ого порядка.

Также на рентгенограммах наблюдаются максимумы, не принадлежащие висмуту и сурьме. Данные максимумы характерны для подложки, на которой находится пленка.

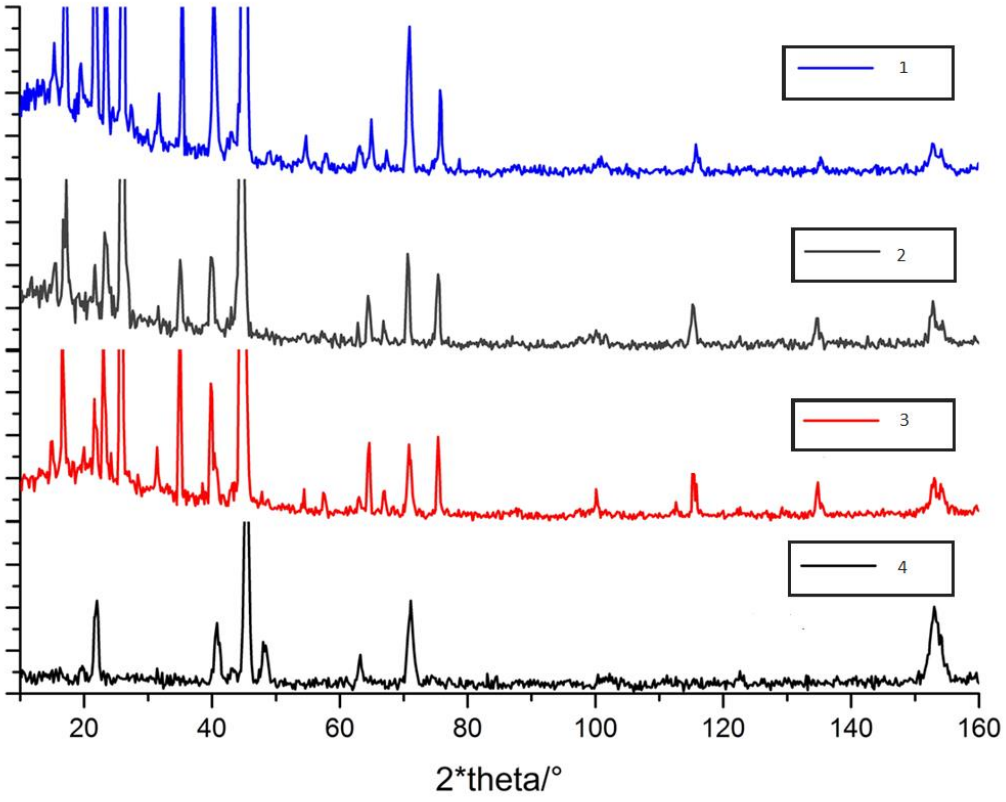


Рис. 1. Рентгенограммы пленок висмута на слюде и монокристалла висмута плоскости (111).
Рентгенограммы: 1 – отожженной пленки висмута с подслоем сурьмы,
2 и 3 – монокристаллических пленок висмута с подслоем и без подслоя сурьмы,
4 – плоскости скола монокристалла висмута

В дальнейшем, поверхность тонких пленок висмута была подвергнута химическому травлению для выявления границ кристаллитов и дислокационных ямок травления.

Исследование структуры тонких пленок висмута показало, что для мелкозернистой структуры размер кристаллитов не превышает 0,5 мкм.

Для отожженных пленок - размер кристаллитов и их форма зависят от типа подложки.

Размер кристаллитов, получаемых на слюде, превышает несколько десятков микрометров. Кристаллиты представляют собой вплетенные друг в друга фигуры странной формы, и граница кристаллита в любом выделенном направлении встречается приблизительно через каждые 3-6 мкм [2];

На подложке из полиимида размер кристаллита не превышает пяти микрометров. Дислокационные ямки травления имеют треугольную форму, свидетельствующую о том, что кристаллографическая ось C_3 направлена перпендикулярно плоскости пленки.

Во время химического травления перекристаллизованных пленок, границы кристаллитов не проявляются на всей поверхности пленки. Дислокационные ямки травления имеют треугольную форму и одинаковую ориентацию на поверхности всей пленки.

Гальваномагнитные свойства. Изучение гальваномагнитных свойств показало, что свойства наноразмерных пленок сильно зависят от размера и ориентации кристаллитов и от типа подложки. Энергетические спектры массивных кристаллов на основе висмута и сурьмы очень чувствительны к деформациям [3]. Из-за механической деформации, связанной с несоответствием ТКР пленки и подложки из слюды, концентрация носителей заряда уменьшается при охлаждении пленки и соответственно увеличивается их подвижность. Наблюдаются рост удельного сопротивления (рис. 2 а) и высокие значения магнетосопротивления (рис. 3 а).

На подложке из полиимида, напротив, увеличивается концентрация носителей. Значения удельного сопротивления пленок на полиимиде значительно ниже, чем пленок на слюде (рис.2 б). Значения магнетосопротивления пленок на полиимиде не высоки (рис. 3 б). Изменение концентрации и подвижности носителей заряда в них влияет на характер температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 4).

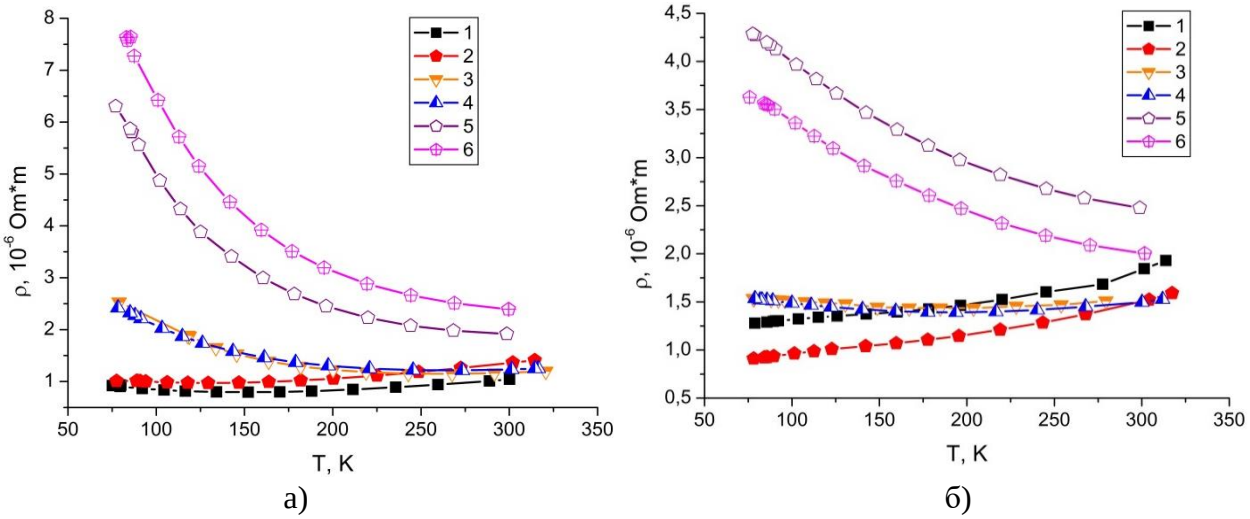


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок на подложках из слюды (а) и на полиимиде (б): 1 и 2 монокристаллические пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 3 и 4 отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 5 и 6 мелкозернистые отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы

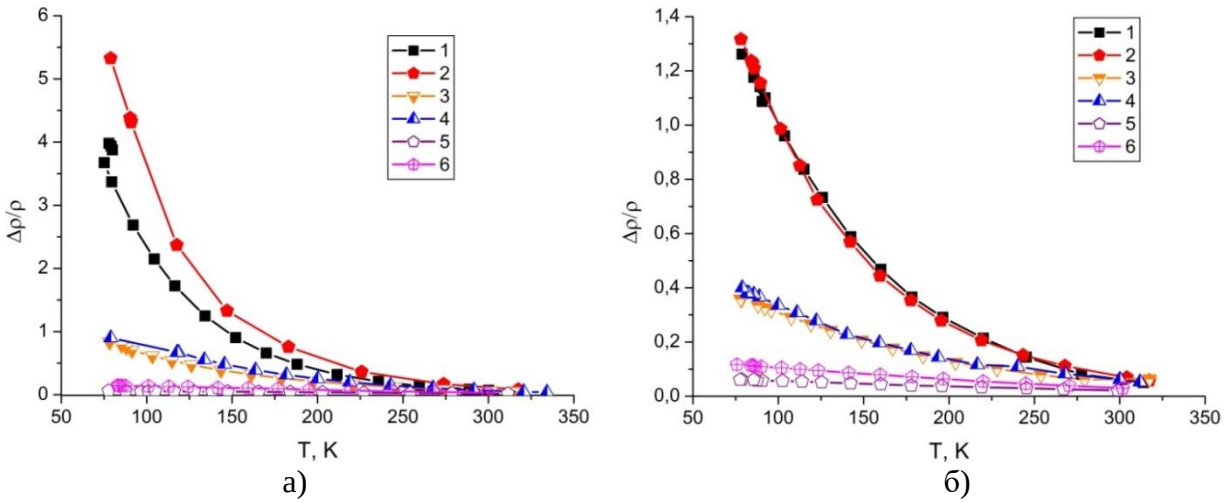
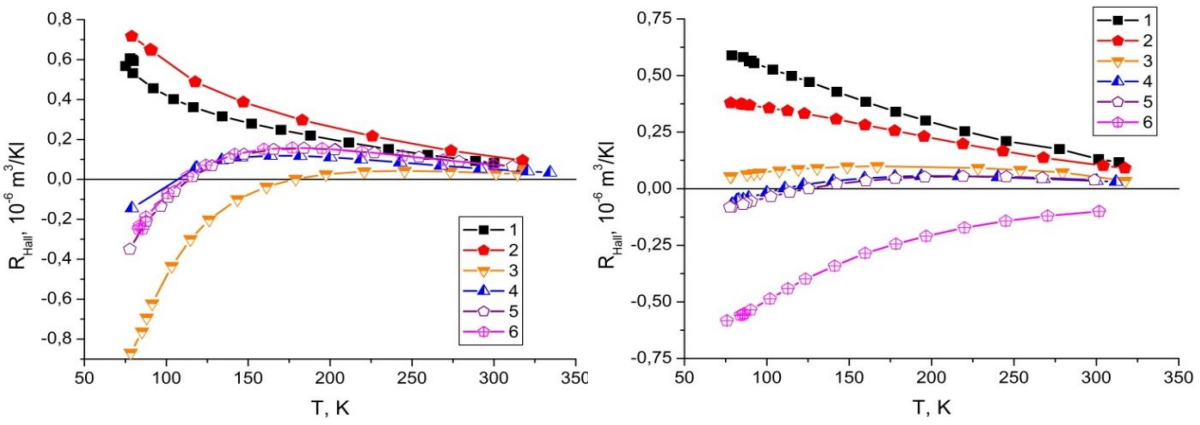


Рис. 3. Температурная зависимость относительного магнетосопротивления пленок на слюде (а) и на полиимиде (б). 1 и 2 монокристаллические пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 3 и 4 отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 5 и 6 мелкозернистые отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы



а) б)

Рис. 4. Зависимость коэффициента Холла от температуры для пленок на слюде (а) и на полиимиде (б). 1 и 2 монокристаллические пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 3 и 4 отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы, 5 и 6 мелкозернистые отожженные пленки висмута без и с подслоем сурьмы

Исследование теплофизических свойств

Измерение теплопроводности тонких пленок находящихся на подложке из другого материала достаточно сложная задача. Одним из методов измерения теплопроводности тонких пленок висмута является 3-ω метод. Данный метод позволяет измерять теплопроводность пленок толщиной несколько десятков нанометров при толщине подложки до сотен микрометров. Однако, предварительные эксперименты, проведенные в Университете Монпелье (Франция), показывают ограниченность данного метода, заключающуюся в невозможности исследования тонких слоев висмута на диэлектрической подложке (полиимид, слюда, стекла). Исследования могут быть проведены, если использовать в качестве подложки кремний.

Выводы

Влияние подслоя сурьмы незначительно для отожженных и монокристаллических пленок. Для мелкозернистых пленок наблюдается зависимость свойств от наличия или отсутствия подслоя сурьмы. Показано, что на кристаллическую структуру пленки влияет ее подложка.

Монокристаллические пленки обладают самым высоким магнетосопротивлением и во всем исследуемом интервале температур наблюдается положительный коэффициент Холла.

Для исследования теплопроводности тонких пленок необходимо продолжать поиск пригодных методов исследования и/или модификацию известных методов.

Литература

1. Grabov V.M., Komarov V.A., Kablukova N.S., Galvanomagnetic properties of thin films of bismuth and bismuth-antimony alloys on substrates with different thermal expansions// Physics of the Solid State. – 2016. – T. 58, № 3. – C. 622-628.
2. Kablukova N.S., Komarov V.A., Skanchenko D.O., Makarova E.S., Demidov E.V., Galvanomagnetic properties of bismuth films with a thin antimony coating or sublayer / Semiconductors. – 2017. – Vol. 51, No. 7. – Pp. 917–920.
3. Brandt N.B., German R., Kulbachinsky V.A., Investigations of the valence band in Bi and Bi-Sb alloys under deformations of the uniaxial tension type / ФТТ. – 1982. – Т.24, №7. – С.1966-1972.

УДК 621.9 : 536.24.08 : 534.11.

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

А.В. Серяков, А.В. Конькин, А.П. Алексеев

ООО «Рудетранссервис», Великий Новгород, Россия

seryakovav@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований коэффициента теплопередачи коротких линейных тепловых труб (ТТ) с паровым каналом, сформированным капиллярно-пористой вставкой в виде внутреннего сопла, близкого к соплу Лаваля, при больших тепловых нагрузках и воздействии внешних вибраций. При больших тепловых нагрузках парообразование в капиллярно-пористом испарителе и распространение пара в паровом канале приобретает пульсационный характер с частотой 400-500 Гц и амплитудой до 10^3Па. Показано, что при внешнем продольном вибрационном воздействии с частотой, равной частоте возникших внутренних паровых пульсаций и амплитудой до 1-2 мм, коэффициент теплопередачи ТТ проявляет экстремальный характер и увеличивается на величину до 20%. Повышение коэффициента теплопередачи обусловлено интенсификацией процесса кипения в многослойном сеточном капиллярно-пористом испарителе ТТ.

Ключевые слова

Тепловые трубы, внешние продольные вибрации, коэффициент теплопередачи.

Вопросы повышения эффективности и увеличения коэффициента теплопередачи коротких линейных ТТ с аксиальным направлением теплового потока представляют собой большой интерес практически во всех случаях охлаждения теплонапряженных узлов и конструкций космических аппаратов и спутников, военных и гражданских объектов и оборудования. В коротких линейных ТТ коэффициент теплопередачи регулируется структурой капиллярно-пористой вставки (фитиля) и выполнением внутреннего парового канала в форме сопла, близкого к соплу Лаваля, что позволяет увеличить коэффициент теплопередачи при высоких тепловых нагрузках, когда начинается процесс кипения и в капиллярно-пористом испарителе образуется большое количество пара [1-3].

Пульсации скорости течения пара (и давления) в коротких линейных ТТ с капиллярно-пористой вставкой отражают эффект, связанный с интенсивным парообразованием в капиллярно-пористом испарителе с кипящим слоем диэтилового эфира и повышением давления в конфузорной части парового канала до значения P^*, при котором температура насыщения T_B рабочей жидкости (температура кипения) становится выше температуры испарителя, $T_B > T_{ev}(P^*)$, при этом кипение в испарителе приостанавливается. Продолжительность пульсации $\Delta\tau_{puls}$ определяется длительностью испарения сгустка пара $\Delta\tau_{ev}$, длительностью распространения этого сгустка в охлаждаемую часть ТТ по паровому каналу $\Delta\tau_L$ и немгновенным процессом конденсации сгустка $\Delta\tau_{cond}$, распространением волны низкого давления обратно в испаритель $\Delta\tau_{sound}$, $\Delta\tau_{puls} = \Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_L + \Delta\tau_{cond} + \Delta\tau_{sound}$. После чего начинается следующий цикл пульсаций [1-3].

Внешнее продольное вибрационное воздействие на корпус ТТ приводит к интенсификации процесса кипения в капиллярно-пористом испарителе ТТ и не

замедляет движения рабочей жидкости в капиллярно-пористой вставке. Энергия, передаваемая кипящей рабочей жидкости в испарителе преобразуется в энергию движущейся сжимаемой паровой фазы, вызывая эффект принудительного расширения и тем самым интенсификацию процесса парообразования (кипения) в сеточном капиллярно-пористом испарителе с инжекторными каналами.

Для экспериментального исследования этих процессов были изготовлены ТТ из нержавеющей стали, с плоским капиллярно-пористым испарителем, с паровым каналом, выполненным в виде газодинамического конфузорно-диффузорного сопла, близкого к соплу Лаваля, и окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины ТТ. Схема ТТ приведена на рис. 1.

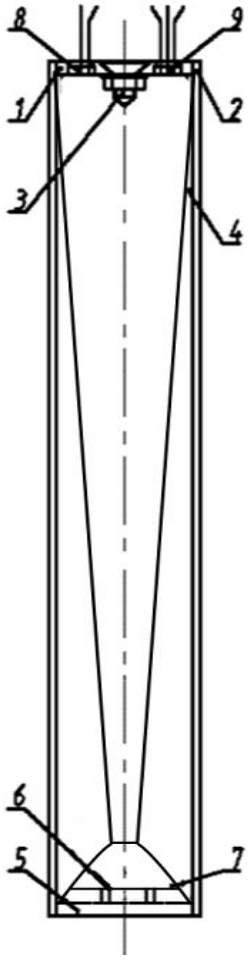


Рис. 1. Тепловая труба. 1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – конический турбулизатор; 4 – капиллярно-пористая вставка; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы; 7 – капиллярно-пористый испаритель; 8, 9 – емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину пленки жидкого конденсата. Измерительная поверхность емкостных датчиков совпадает с внутренней поверхностью плоской верхней крышки ТТ. Подробное описание изготовления ТТ и емкостных датчиков приведено в [4 – 5]

Пористость капиллярно-пористой вставки и испарителя 72%, и вместе они образуют единую гидравлическую систему доставки рабочей жидкости в испаритель при работе ТТ. В качестве рабочей жидкости применен диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$, имеющий температуру кипения при атмосферном давлении T_B =308.65K (35.5°C), температуру замерзания T_F = 156.95K (−116.2°C), критические параметры T_C =466.55K (193.4°C), P_C =3.61MPa. Максимальный объем диэтилового эфира при заполнении ТТ 17.3 см^3.

Малогабаритный открытый емкостный датчик представляет собой устройство, внешний вид которого приведен на рис. 2.

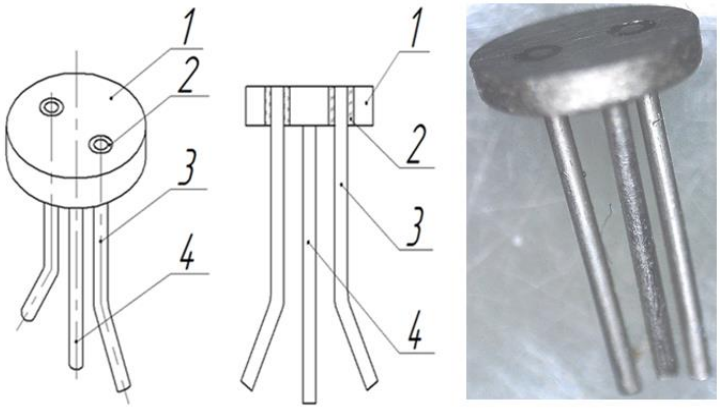


Рис. 2. Схема открытого малогабаритного емкостного датчика. 1 – фланец с измерительной поверхностью; 2 – стеклянные изоляторы; 3 – измерительные электроды с измерительными торцевыми поверхностями; 4 – заземляющий электрод. Корпус датчика изготовлен из ковара 29 НК по ГОСТ 10994-74. В каждом сквозном отверстии впаяны вакуумно-плотные металлостеклянные спаи диаметром 1 mm с жестко зафиксированными электродами, также выполненными из ковара

Предварительно были проведены экспериментальные исследования пульсационных характеристик ТТ, и исследования коэффициентов теплопередачи, с помощью вихревого проточного калориметра в стационарном состоянии, все подробности проведенных экспериментальных исследований приведены в [1-4].

Результаты измерений частот пульсаций внутри паровых каналов в зависимости от температурного напора (перегрева) на испарителе ТТ относительно температуры кипения диэтилового эфира представлены в таблице 1, а результаты измерения и сопоставления коэффициентов теплопередачи $К_{ТТ}$ представлены на рис. 3.

Таблица 1

Частоты пульсаций в паровом канале ТТ

Перегрев испарителя, δT, K	Частота пульсаций f_1, Гц	Частота пульсаций f_2, Гц
9.05	386±5	-
10.1	396±5	-
11.03	426±5	406±5
12.15	450±5	420±5
13.0	456±5	437±5
14.07	474±5	440±5
15.03	474±5	454±5
16.0	478±5	453±5
17.1	490±5	460±5
18.06	491±5	472±5
19.02	495±5	473±5
20.12	502±5	474±5

f_1, Гц – частоты пульсаций в ТТ с паровым каналом в виде сопла; f_2, Гц – частоты пульсаций в ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом.

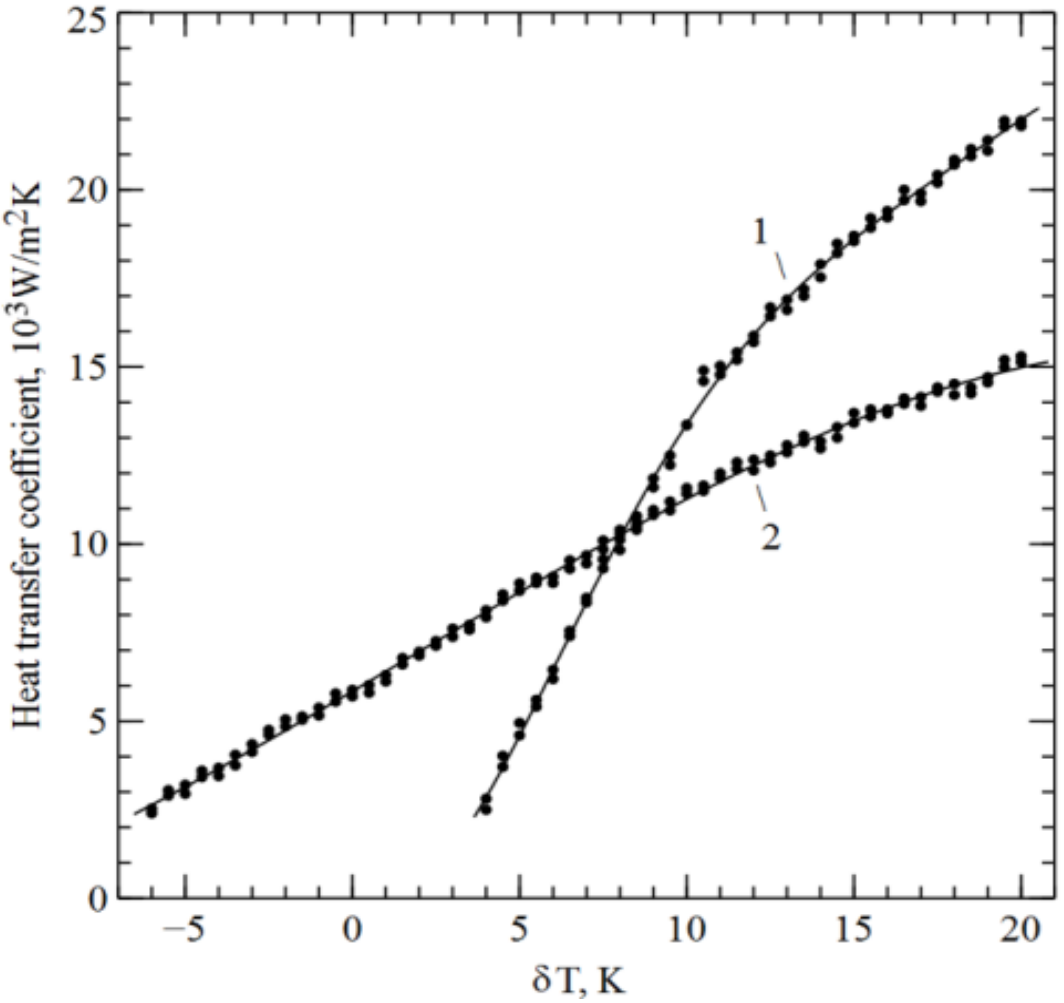


Рис. 3. Сравнение коэффициентов теплопередачи ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лаваля и ТТ с цилиндрическим паровым каналом, при равных габаритных размерах. 1 – ТТ с паровым каналом в виде сопла; 2 – ТТ со стандартным паровым каналом, в зависимости от перегрева испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира $\delta T = T_{ev} - T_B = T_{ev} - 308.65K$ (35.5°C). Погрешность измерений коэффициентов теплопередачи не превышает 3% [5 – 8]

Были проведены измерения коэффициента теплопередачи ТТ при внешнем вибрационном (колебательном) воздействии. Для этого была создан электродинамический вибрационный калориметрический стенд на основе мощного звукового динамика 100 ГДН – 3-8, рабочий диапазон частот которого лежит в пределах 31,5Гц - 1000 Гц, и вихревого проточного микрокалориметра-насадки с проточной водой [4] и резистивного нагревателя, см. рис. 4. Температуру воды на входе в микрокалориметр, разность температур (величину подогрева) расход проточной воды измеряли аналогично измерениям, проведенным на стационарном калориметре. Суммарная погрешность измерения тепловой мощности ТТ с помощью микрокалориметра не превышает 2%.

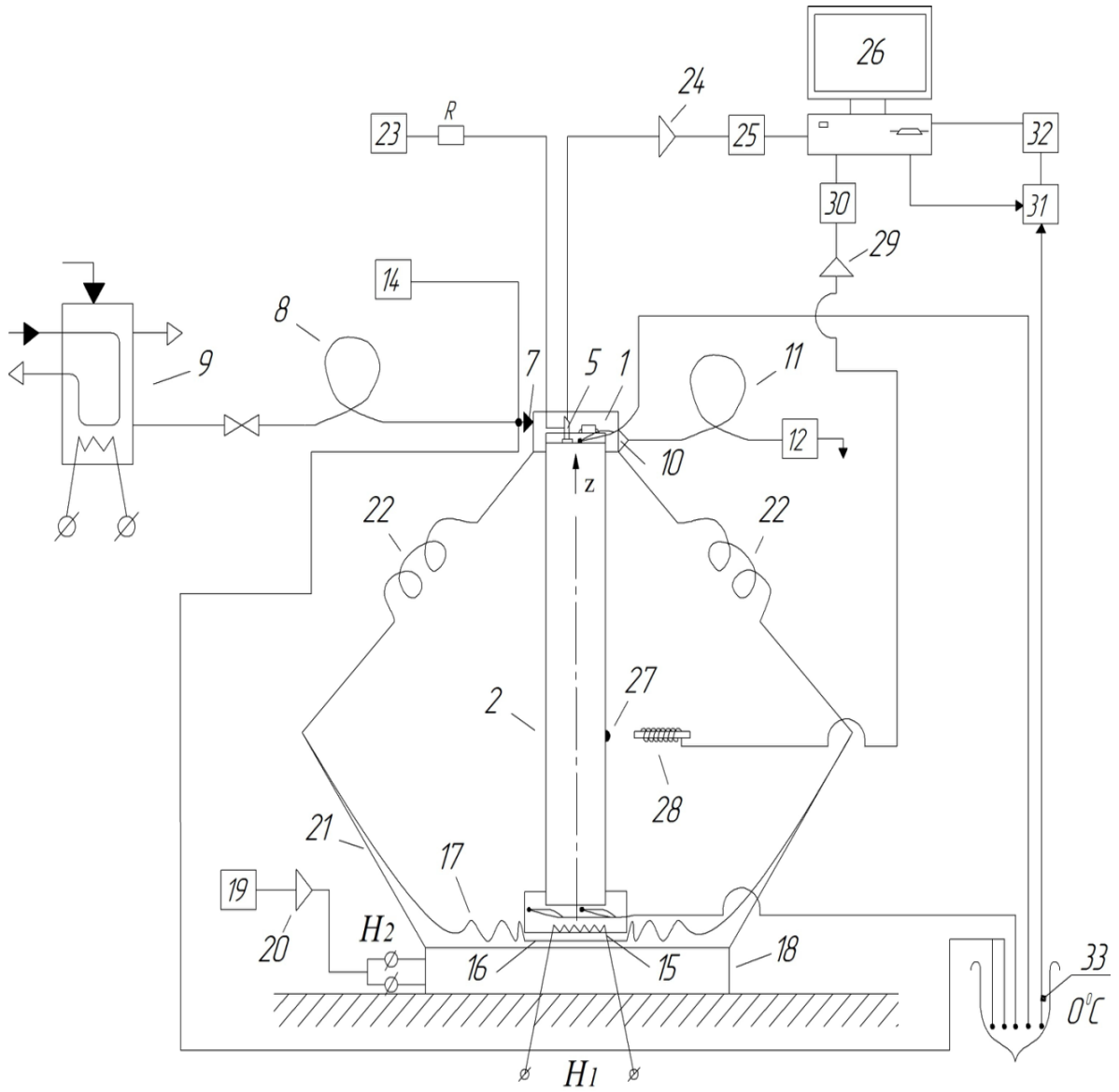


Рис. 4. Схема вибрационных измерений коэффициента теплопередачи коротких ТТ.
1 – микрокалориметр; 2 – ТТ; 3 – фланец; 4 – генератор; 5 – емкостный датчик; 6 – каналы для проводов; 7 – входной штуцер; 8 – напорный шланг; 9 – сосуд постоянного напора; 10 – выходной штуцер; 11 – сливной шланг; 12 – расходомер; 13 – крышка; 14 – генератор пузырьков; 15 – нагреватель; 16 – опорный диск; 17 – диффузор; 18 – звуковой динамик; 19 – генератор; 20 – усилитель; 21 – диффузородержатель; 22 – пружины; 23 – генератор; 24 – усилитель; 25 – осциллограф; 26 – компьютер; 27-постоянный магнит; 28- измерительная катушка; 29- устройство контроля вибраций; 30 – частотомер; 31 – коммутатор; 32 – вольтметр; 33 – сосуд Дьюара

Результаты измерений коэффициента теплопередачи представлены на рис.5.При внешнем вибрационном воздействии с частотой, равной частоте возникших пульсаций f_{puls} давления пара в паровом канале в виде сопла, коэффициент теплопередачи ТТ увеличивается на величину до 20% при максимальном перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 20К$. Резонансное повышение коэффициента теплопередачи обусловлено интенсификацией процесса кипения в испарителе при внешнем продольном вибрационном воздействии на ТТ

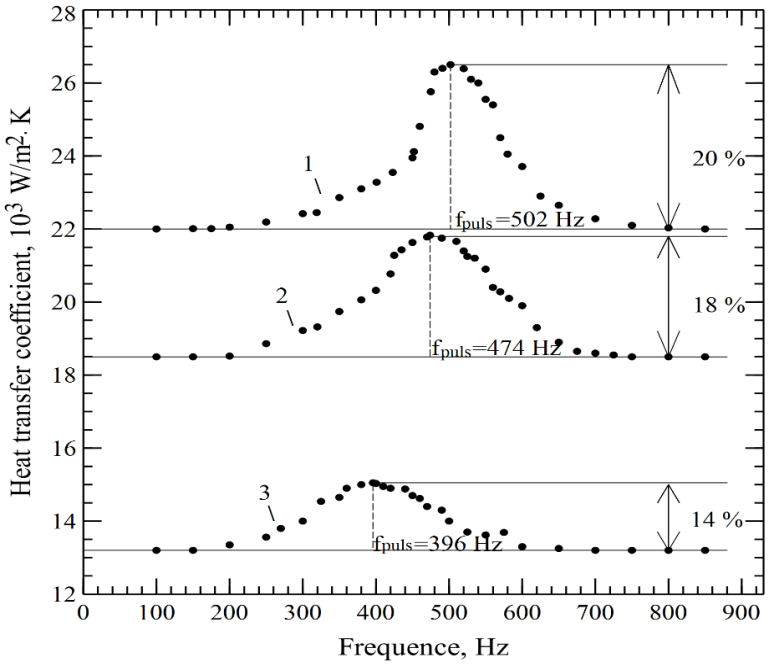


Рис. 5. Результаты измерений коэффициента теплопередачи коротких ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лаваля. 1 – зависимость K_{HP} при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 20К$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 502Гц$; 2 – зависимость K_{HP} при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 15К$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 474Гц$; 3 – зависимость K_{HP} при перегреве испарителя $\delta T = T_{ev} - T_B = 10К$ и частоте внутренних пульсаций пара $f_{puls} = 396Гц$

Литература

1. Seryakov A.V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application 2014, v. 2, N 2, pp. 40-49.
2. Seryakov A.V., Ananiev V.I., Orlov A.V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes // Proceedings of the 9th Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources. Minsk, Belarus, 7-10 September 2015, v 2. p. 168-176.
3. Серяков А.В. Исследование характеристик коротких низкотемпературных тепловых труб с паровым каналом в виде сопла.// Прикладная Механика Техническая Физика 2016. Т.57, №1, с. 1-15.
4. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. 1995. Washington USA, Taylor and Francis.
5. Серяков А.В., Михайлов Ю.Е., Шакшин С.Л. Измерение толщины пленки конденсата рабочей жидкости с помощью емкостных датчиков в низкотемпературных тепловых трубах// Вестник СибГАУ 2016. Т.17. № 2, с. 444-457.
6. Патент на полезную модель №152108 / Емкостный датчик определения толщины слоя жидкости / Серяков А.В. Опубликовано 27.06.2015.Бюллетень № 18 / 2015.
7. Seryakov A.V. The Study of Condensation Processes in the Low-Temperature Short Heat Pipes with a Nozzle-Shaped Vapour Channel // Engineering, 2017.v. 9, pp.190-240.
8. Seryakov A.V. Intensification of heat transfer processes in the low temperature short heat pipes with Laval nozzle formed vapour channel//American Journal of Modern Physics 2018, v.7, N 1, pp. 48-61.

УДК 621.362; 621.315.562

РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ

А.С. Тукмакова, А.В. Новотельнова, Д.Б. Щеглова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

astukmakova@itmo.ru

Аннотация
Исследовано изменение теплопроводности порошкового материала в процессе искрового плазменного спекания. Рассчитана зависимость пористости материала от температуры спекания. Получена зависимость теплопроводности от температуры спекания расчетным путем. Проведено сравнение с экспериментальной зависимостью.
Ключевые слова
Искровое плазменное спекание, термоэлектричество, объемные наноматериалы, пористые материалы

Искровое плазменное спекания (ИПС) применяется для обработки порошковых материалов и создания объемных наноматериалов [1]. В процессе ИПС порошки обрабатываются давлением за счет приложения одноосной нагрузки порядка нескольких десятков МПа. В то же время, через установку и обрабатываемый порошок пропускается электрический ток, вызывающий разогрев материала. В результате нагрева и деформации из исходного порошка получается компактированный образец с плотностью, близкой к теоретической.

ИПС позволяет получить термоэлектрические материалы с улучшенным показателем термоэлектрической добротности. В частности, возможно получение материалов со сниженным значением теплопроводности и относительно высокой величиной фактора мощности.

Для контроля за протеканием процесса ИПС используется гидравлическая система регулирования давления и система регулирования температуры, включающая измерение температуры спекания при помощи термопары (либо пирометра). Термопара помещается в отверстие в матрице пресс-формы. Таким образом, имеется возможность измерения температуры вблизи образца в одной точке. Эти данные нельзя считать точными, так как они не отображают подробную картину распределения поля температуры в образце. Показано, что температура спекания в образце неоднородна и отличается от значений температуры, полученных при помощи термопары [2].

Более того, при ИПС имеет место процесс усадки порошка, сопровождающийся ростом зерна, образованием более крупных кластеров зерен за счет поверхностной диффузии, проскальзыванием зерен друг относительно друга. Одним из наиболее простых параметров, позволяющих дать оценку этим процессам, служит пористость материала. Расчет изменения пористости позволяет дать оценку изменения свойств материала – теплопроводности, электропроводности, модуля Юнга и т.д.

В данной работе, основываясь на экспериментальных результатах, опубликованных ранее в [3], проведен аналитический расчет зависимости коэффициента теплопроводности κ от пористости термоэлектрического материала на основе сплавов Ge-Si.

Нами были проанализированы данные по усадке сплавов Ge-Si для температуры спекания T_s 1150°С. Конечная относительная плотность материала равнялась 0,993. Соответственно, конечная пористость материала составила 0,007, максимальная пористость $\theta_м$ была принята равной 0,5. Коэффициент теплопроводности конечного образца κ_s был принят равным 3,3 Вт/м*К.

Расчет пористости выполнялся в соответствии с формулой (1) [4]:

$$\kappa = \kappa_s \left(1 - \frac{\theta}{\theta_м}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Принимая зависимость κ от температуры известной в соответствии с экспериментом возможно определить θ в каждый момент времени спекания, характеризующийся определенной величиной T_s. Результаты расчета представлены в таблице.

Таблица

Расчетная зависимость пористости материала от температуры спекания

T_s, °С	κ, Вт/м*К	θ, отн.ед.
22	0.15249	0.435614
160	0.17595	0.42917
313	0.21701	0.418539
425	0.25806	0.408566
500	0.29912	0.399108
600	0.35777	0.386317
700	0.39883	0.377777
800	0.45161	0.367219
900	0.49853	0.358174
1000	0.84457	0.298449
1050	1.1	0.259625
1100	2.55	0.078962
1150	3.23	0.007096

Используя полученные зависимости пористости от температуры возможно получить зависимость коэффициента теплопроводности от температуры спекания. На рис. 1 представлена расчетная и экспериментальная зависимости κ от температуры спекания, на рис. 2 в зависимости от пористости образца.

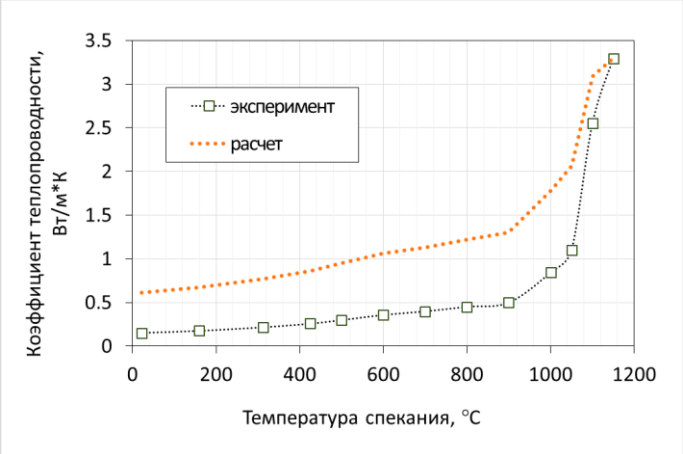


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности при увеличении температуры спекания

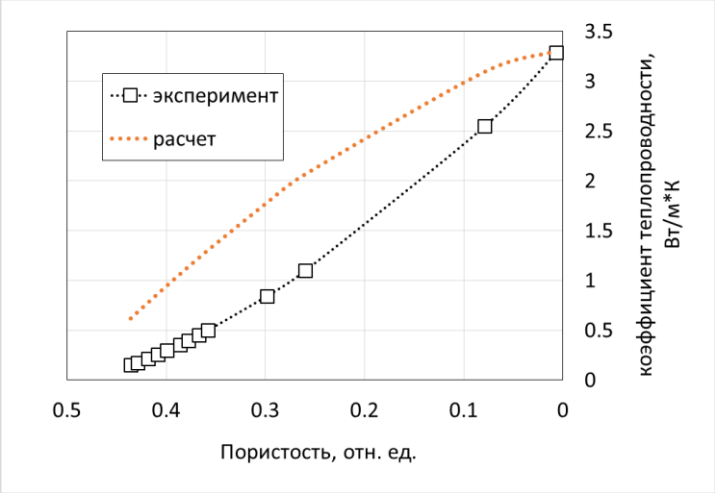


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопроводности при изменении пористости материала

Характер кривых совпадает. Однако, величина к расходится по абсолютным значениям. Вероятной причиной расхождения можно считать некоторые из принятых нами допущений:

1) Величина максимальной пористости была взята исходя из средних величин θ_M различных материалов. Необходимо проведение экспериментального исследования и уточнения величины θ_M.

2) Величина κ_s соответствовала объемному наноструктурированному материалу. Однако, κ_s должна соответствовать кристаллическому материалу, в нашем случае, исходному твердому раствору.

В дальнейшем, данные зависимости могут использоваться для расчета процесса ИПС при помощи численных методов. В частности, для получения более точных значений температуры спекания в образце в каждый момент времени, а также для оценки скорости усадки материала.

Литература

1. Guillon O., Gonzalez-Julian J., Dargatz B., Kessel T., Schierning G., Rathel J., Herrmann M. Field-Assisted Sintering Technology:Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments // Advanced Energy Materials. – 2014. – №16, С. 830-849.
2. Maizza G., Mastrorillo G.D., Grasso S., Ning H., and Reece M.J. Peltier effect during spark plasma sintering (SPS) of thermoelectric materials // Journal of Materials Science. – 2017. – № 52. – С. 10341–10352.
3. Tukmakova A., Novotelnova A., Samusevich K., Usenko A., Moskovskikh D., Smirnov A., Mirofyanchenko E., Takagi T., Miki H., Khovaylo V.V. Simulation of Field Assisted Sintering of Silicon Germanium Alloys // Materials – 2019. № 12. – С. 570-583.
4. Montes J.M., Rodriguez J.A., Herrera E.J. // Journal of Materials Science. 2016. – № 46. – С. 251 – 256.

УДК 621

ОПЕРАТОРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ

В.Е. Фомин, А.В. Асач, И.Л. Тхоржевский, Е.С. Макарова, А.В. Новотельнова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Vladdisslav.fomin@yandex.ru

Аннотация
Рассмотрено влияние различных факторов на величину неопределенности измерений коэффициента температуропроводности термоэлектриков методом лазерной вспышки. При помощи компьютерного моделирования изучено влияние таких факторов, как геометрические размеры образца, степень их отклонения от рекомендуемых значений, толщина графитового напыления в пропорции от толщины самого образца, а также форма и длительность импульса.
Ключевые слова
Метод лазерной вспышки, коэффициент температуропроводности, термоэлектрики.

Введение

Метод лазерной вспышки впервые был предложен Паркером [1]. Данный метод является широко распространенным методом измерения теплофизических свойств различных образцов. Одна из причин этого – простота и удобство измерений, а также широкий диапазон коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов. Однако, данный метод имеет и недостатки. К таковым можно отнести большое число факторов, которые могут увеличить неопределенность измерений. К ним можно отнести соответствие геометрических размеров образцов рекомендуемым, степень их отклонения от рекомендуемых значений, толщину графитового напыления и другие. Неопределенность, возникающая под влиянием этих факторов, может быть охарактеризована как операторная. В данной работе рассматривается величина неопределенности, возникающая в этих ситуациях.

Принцип работы метода заключается в нагреве одной из сторон образца лазерным импульсом. Время нагревания импульсом должно стремиться к минимальному значению. В результате этого тепловой поток распространяется по образцу, вызывая изменение температуры на обратной стороне. Детектор считывает информацию об изменении температуры на обратной стороне. На основе полученных данных строится термограмма (зависимость изменения температуры на обратной стороне от времени) и вычисляется коэффициент температуропроводности.

Коэффициент температуропроводности определяется по формуле:

$$\alpha = 1{,}36796 \cdot \frac{h_s^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (1)$$

Здесь h_S – высота образца и $t_{1/2}$ – время нагрева образца до половины от максимальной температуры.

Согласно рекомендациям производителя [2], исследуемые образцы могут иметь высоту от 0,1 до 6 миллиметров. Диаметр образца d_s, в зависимости от используемого

держателя, может составлять от 3 до 25,4 миллиметров. Верхняя и нижняя поверхности образца должны быть плоскопараллельными.

Поверхность образцов покрывается графитовым напылением для обеспечения наилучшего поглощения тепла, передаваемого лазерным излучением. В большинстве случаев, толщина слоя графита не имеет фиксированных значений.

Считается, что измерение, при соблюдении всех вышеизложенных условий, всегда имеет одинаковую точность и различные значения высот и диаметров не влияют на величину неопределенности.

Целью данной работы является оценка неопределенности измерений при соблюдении рекомендаций производителя по геометрическим параметрам образца и его предварительной подготовке. Анализ проводился с использованием методов компьютерного моделирования.

Моделирование

Компьютерная модель для анализа процессов измерений коэффициента температуропроводности методом лазерной вспышки образцов была разработана в программной среде Comsol Multiphysics.

В модели проводилось решение дифференциальных уравнений теплопроводности в твердом теле методом конечных элементов:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = Q \tag{2}$$

$$\boldsymbol{q} = -\lambda \nabla T \tag{3}$$

Граничным условием являлся радиационный теплообмен с окружающей средой:

$$-\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q} = Q_b \tag{4}$$

$$-\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q} = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) \tag{5}$$

Диаметр области детектирования составлял 0,67 от значения диаметра образца. Длительность действия лазерного импульса составляла 2 мс. Температура окружающей среды и начальная температура образца имели значение 293 К.

В модели для описания свойств материалов образцов были использованы свойства таких материалов как графит [3], теллурид висмута [4] и силицид германия [5]. Свойства материалов, использованных при моделировании, указаны в таблице:

Таблица

Свойства материалов

Материал	λ, Вт/ (м·К)	ρ, кг/м^3	C, Дж/(кг·К)
Графит[3]	115	1830	721
Теллурид висмута[4]	1,63	7860	154
Силицид германия [5]	2,21	2860	787

Для выявления степени влияния диаметра образца на величину неопределенности значения диаметра менялись от 6 до 25,4 мм, при постоянной высоте образца 1 мм. Полученная зависимость изображена на рис. 1.

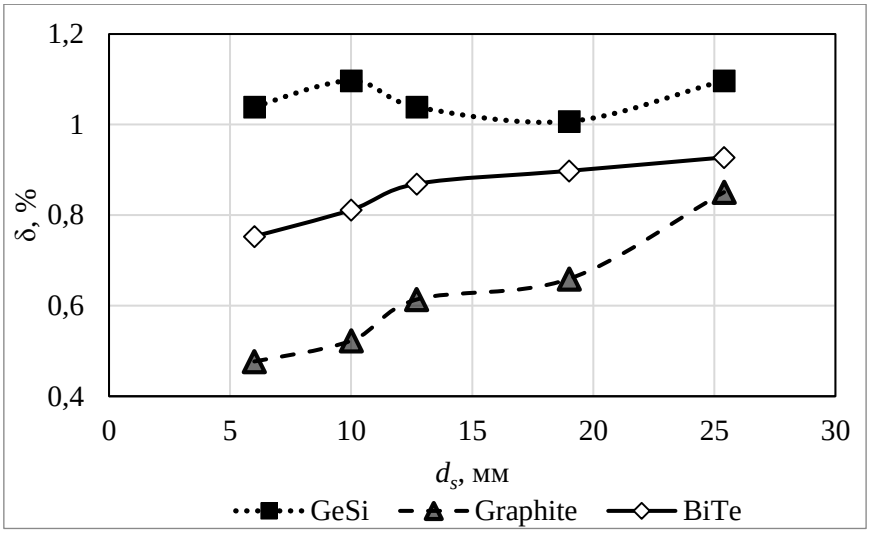


Рис. 1. График зависимости неопределенности от диаметра/

Как видно из рис. 1, значения диаметра образцов сказываются на значении неопределенности. Наибольшее значение не превышает 1,2%, что меньше инструментальной погрешности установки 3% [6].

Для оценки влияния высоты образца на неопределенность высота менялась в пределах от 0,1 до 1 мм, при постоянном диаметре 12,7 мм. Результаты математического моделирования представлены на рис. 2.

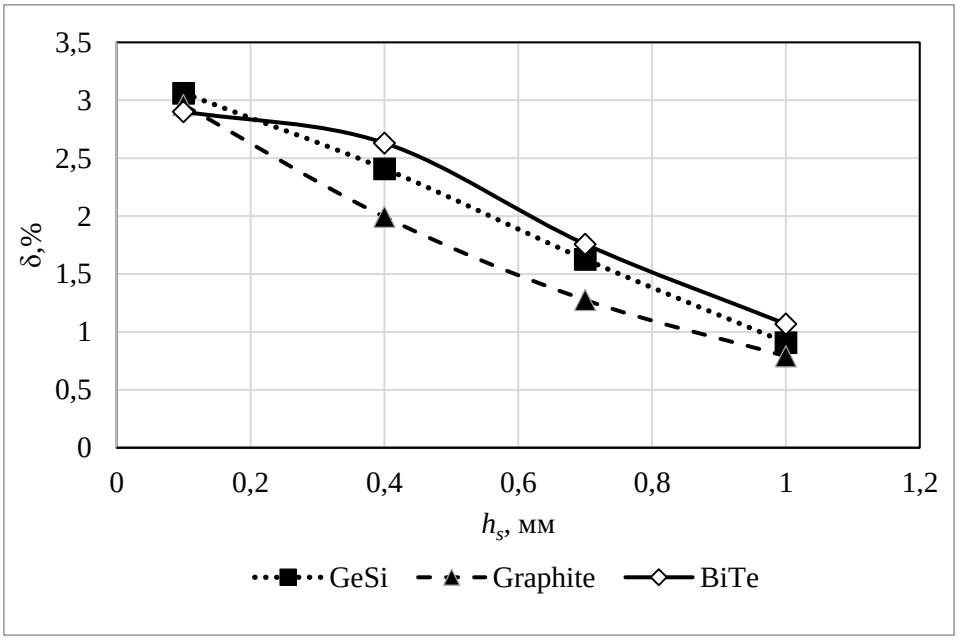


Рис. 2. График зависимости неопределенности от высоты образца

Как видно на графике, представленном на рис. 2, при значениях высоты образца от 0,1 до 1 мм, неопределенность измерений падает. Максимальное значение находится в районе 3 процентов.

Для оценки влияния толщины графитового напыления h_{gr} на результирующее значение коэффициента теплопроводности были проведены численные эксперименты для образцов высотой от 0,1 до 1 мм. Для каждого случая подбиралось несколько значений толщины графитового напыления. Установлено, что при соблюдении соотношения h_{gr} /$h_s \leq 0{,}05$ значение неопределенности не превышает 1%. Однако, при

последующем увеличении соотношения толщин наблюдался рост неопределенности измерений. При соотношении h_{gr} /h_s =0,1 неопределенность измерений достигает значения 8 %, что превышает погрешность установки.

Несоблюдение рекомендаций по геометрической форме образцов оказывает сильное влияние на неопределенность измерений. Использование образцов в форме усеченного цилиндра приводит к существенному снижению точности измерений. Уже при значении угла усечения цилиндра 1,5° неопределенность измерений, обусловленная отклонением от рекомендуемой геометрической формы образца, достигает 3%. Дальнейшее увеличение угла усечения приводит к росту неопределенности измерений существенно превышающей значения, заявляемые производителями установок [2]. Неопределенность измерений, обусловленная отклонением от плоскопараллельности сторон образца может достигать 90% [7]. Данные моделирования процесса измерения образцов термоэлектриков нестандартной формы согласуются с экспериментальными результатами измерения образцов вермикулита нестандартной формы [6].

В [6] значение операторной погрешности связывали с формой и величиной энергии импульса, производящего обработку образца. Моделирование с использованием в качестве источника энергии импульсов прямоугольной формы (лазерная вспышка) и импульсов с распределением энергии во времени по нормальному закону (ксеноновая вспышка) показало, что расхождение в значениях неопределенности измерений при использовании импульсов близкой по величине длительности и интенсивности не превышает 1,5%. При этом длительность импульса оказывает существенное влияние на точность измерений. Для импульсов с нормальным распределением энергии этот эффект более существенен. Так увеличение длительности импульса приводит к возрастанию неопределенности измерений от 3% при 0.1 мс до 14% при 1 мс.

Заключение

Операторная погрешность при измерении образцов методом лазерной вспышки образцов стандартной цилиндрической формы с рекомендуемыми производителями установок значениями диаметра и высоты образца не превышает 3%.

Отклонения от плоскопараллельности сторон образца вызывают существенное снижение точности измерений. Поэтому рекомендуется контролировать технологический процесс подготовки образцов и не выходить за рамки, установленные производителем.

При подготовке образцов к измерению коэффициента температуропроводности методом лазерной вспышки следует уделять внимание процессу напыления графитового слоя в случае, если толщина образца близка к минимально допустимой производителем.

Поток тепловой энергии, передаваемый образцу импульсом лучистой энергии, следует подбирать с наименьшим возможным временем воздействия.

Литература

1. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L., A flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity, Journal of Applied Physics, 32 (9), 1961, pp. 1679-1684.

2. Laser Flash Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.linseis.com/wp-content/uploads/2018/12/LINSEIS-LFA-1000-2000-v1.pdf.
3. С.В. Шулепов. Физика углеграфитовых материалов. (М.: Металлургия, 1972) 256 с.
4. Kasap S., Capper P. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. Springer US, 2007
5. Usenko A., Moskovskikh D., Gorshenkov M., Voronin A., Stepashkin. A., Kaloshkin S., Arkhipov D., Khovaylo V. Enhanced thermoelectric figure of merit of p-type $Si_{0.8}Ge_{0.2}$ nanostructured spark plasma sintered alloys with embedded SiO_2 nanoinclusions. Scripta Materialia, 2017, no. 127, pp. 63-67.
6. Asach A.V., Isachenko, G.N., Novotelnova A.V., Fomin V.E., Samusevich K.L., Tkhorgevskii I.L. Effect of Sample-Shape Imperfection on Uncertainty in Measurements of the Thermal-Conductivity by the Laser-Flash Method. Semiconductors. 2019. Vol. 53. No. 6. pp. 723–726.
7. Прошкин А.В. Оценка операторных погрешностей при измерении коэффициентов теплопроводности вермикулитовых изделий / Прошкин А.В., Набиулин А.Б., Федоров В.А., Калиновская Т.Г. // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 1. – С. 131-134.

УДК 621.564

ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИМПЕРАТИВЫ И ПРИОРИТЕТЫ ВЫБОРА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ ИНДУСТРИИ ХОЛОДА

О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, А.А. Никитин, В.В. Митропов
А.В. Шарков, Ю.А. Рахманов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

laptev_yua@mail.ru

Аннотация
Серьезные, всепроникающие и необратимые последствия климатических изменений ожидают человечество, по мнению экологов, уже в первой половине XXI века. Необходимо адаптироваться к этим условиям и, прежде всего, путем снижения выбросов углекислого газа в атмосферу. Рассмотрены рабочие вещества техники низких температур, оказывающие заметное влияние на климат Земли, их альтернативы, способные быть их адекватной заменой в ближайшей и среднесрочной перспективе.
Ключевые слова
Холодильный агент, гидрофторуглероды, гидрофторолефины, ХФУ, ГХФУ, глобальное потепление.

В истории холода известны слова великого русского ученого М.В. Ломоносова о стуже: «Эта область начинается от самого низкого градуса теплоты или, что тоже, от наибольшего градуса стужи, который пока еще никак не отмечен и не показан. Она оканчивается при температуре замерзания воды». Знаменательны август 1834 года, когда появился патент Якоба Перкинса «Аппарат для производства холода и охлаждающих жидкостей», и июль 1908 года, когда был сжижен «солнечный» газ гелий, дата, которую до часов и минут и числа миллилитров жидкого гелия помнят поколения криогенщиков.

Первый международный конгресс по холоду в августе 1908 года стал вехой в развитии техники низких температур в России и в мире. В 1937 году появился первый советский домашний холодильник объемом 120 л на сернистом ангидриде, а в США – популярный домашний холодильник на пропане с компрессором и электромотором также в открытом исполнении. С учетом пожароопасности пропана, специфического запаха сернистого ангидрида подобные холодильники в быту были не безупречны.

Синтез дифтордихлорметана (фреон-12) в 1928 году – синтетического хладагента без запаха, не горючего, не токсичного, обладающего превосходными термодинамическими характеристиками, произвел революцию в технике низких температур. Фреоны и их смеси, обеспечили практически все потребности в холоде промышленности, торговли, бытовых услуг. Оставшиеся 10–15% холода оставили за аммиаком.

В 1986 году в мире производили более 1 млн 300 тыс. тонн синтетических хладагентов, получивших по классификации ИСО обозначения R12, R11, R113, R114, R115, R502, R503 и др., молекулы которых содержали атомы хлора, фтора и брома. Оказалось, что атомы хлора и брома способствуют разрушению озонового слоя Земли (потенциал ОРП), и в соответствии с Монреальским протоколом 1987 года [1] последовательно запрещено производство и применение хладагентов, содержащих хлор, а также всех бромированных хладагентов. Прекращение производства и применения хладагентов HCFC-класса R22, R123, R142b, R21, R141b (так называемые ГХФУ–хладагенты) отнесено на 2020 год (таб. 1).

Таблица 1

**Озоноразрушающий потенциал (ОРП)
и потенциалы глобального потепления (ПГП) ХФУ- и ГХФУ-соединений,
регулируемых Монреальским протоколом**

Хладагент	Химическая формула	ОРП	ПГП (100 лет)	Группа безопасности
R11	CCl_3F	1	4750	A1
R12	CCl_2F_2	1	10890	A1
R113	$C_2Cl_3F_3$	1	6130	A1
R502	R22/R115	0,25	4700	A1
R22	$CHCl_2F$	0,055	1760	A1
R142b	$C_2H_3ClF_2$	0,07	2310	A2

Промышленность оперативно синтезировала озонобезопасные гидрофторуглероды (HFC-класс), хладагенты: R134a, R125, R161, смеси R404A, R410A, R407C, R507, R508. В молекулах этих хладагентов нет атомов хлора и брома (ОРП = 0). Однако и озонобезопасные хладагенты оказались в центре внимания мирового сообщества. В 1992 году в Рио-де-Жанейро главы государств и правительств рассмотрели климатические изменения, происходящие на планете и, в частности, изменения, обусловленные присутствием парниковых газов в атмосфере Земли, их антропогенным воздействием на климат планеты. Принята конвенция ООН об изменении климата и страны-подписанты практически каждый год обсуждают последствия этих явлений, а в декабре 1997 года приняли Киотский протокол [2], куда включены шесть парниковых газов. Главные виновники за антропогенное воздействие на климат Земли – диоксид углерода (CO_2), метан, закись азота (N_2O), гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ) и шестифтористая сера (SF_6). В «корзину» парниковых газов вошли все озонобезопасные гидрофторуглероды: R134a, R23, R32, R125, RC318, R218, R116, R152a, R227ea, R236fa, R245fa, их смеси (табл. 2).

Таблица 2

Рабочие вещества ГФУ-класса

Хладагент	Химическая формула	ОРП	ПГП (100 лет)	Группа безопасности
R134a	$C_2H_2F_4$	–	1430	A1
R125	C_2HF_5	–	3500	A1
R32	CH_2F_2	–	674	A2
R143a	$C_2H_3F_3$	–	4470	A2
R152a	$C_2H_4F_2$	–	138	A2
R404A	R125/R143a/R134a	–	3900	A1
R407C	R32/R125/R134a	–	1600	A1
R410A	R32/R125	–	1924	A1
R507A	R125/R143a	–	4000	A1
R438A	R32/R125/R134a/ R600/R601a	–	2265	A1

Последняя четверть XX века запомнилась глобальными изменениями климата: температура приземного слоя воздуха возросла на 0,7 ºС, температура подледной воды в районе Северного полюса поднялась почти на два градуса, что привело к подтаиванию льда снизу и т. д. По прогнозам ООН к 2100 году температура на поверхности Земли может повыситься в среднем на 2 ºС, что повлечет исчезновение «ледяных шапок» Земли, разрушение ледяного пласта Антарктиды, в конечном итоге

повышение уровня Мирового океана, затопление огромных территорий, нарушение экологического равновесия на планете.

Климат планеты сегодня – международная проблема с ее экономическими, политическими и социальными аспектами, действительно поставившими во главу всего рациональное управление ресурсами биосферы.

По данным Росгидромета в России за последние 100 лет среднегодовая температура возросла более, чем на 1ºС. За период 1907–2016 гг. подобный мировой показатель по данным Межправительственной группы экспертов по вопросам изменения климата (МГЭИК) за этот же период оценивается в 0,74ºС. В ряде регионов рост температуры за последние сто лет превысил 3ºС, а засухе и опустыниванию подверглись миллионы га земли. Ощутим экономический ущерб от аномально жаркой погоды, от засухи, снижения урожайности, снижения социальных, экономических и экологических показателей регионов.

В декабре 2015 года на Всемирной конференцией по климату в Париже подписано соглашение, цель которого не допустить роста среднегодовой температуры более, чем на 2ºС. В развитие Парижского саммита в октября 2016 г. принята так называемая Кигалийская поправка (КП–16) [3], имеющая целью завершить вывод из обращения озоноразрушающих веществ (ОРВ) и в дополнение к нему кардинально снизить использование гидрофторуглеродов (ГФУ), имеющих значительный потенциал глобального потепления (ПГП) (таб. 2), поскольку выбросы ГФУ к 2050 г. могут достигнуть 20% от выбросов всех парниковых газов планеты. Согласно Кигалийской поправке Россия вошла в подгруппу II группы Г (развитые страны) и к 2036 г. должна сократить потребление ГФУ на 85% относительно базового уровня (среднего потребления за 2011–2013 гг.). Страны, не ратифицировавшие КП-16, не смогут экспортировать продукцию, содержащую ГФУ, а также импортировать ГФУ (а это R134a, R32, R410A и т. д.) и соответствующее оборудование (компрессоры, системы кондиционирования воздуха, бытовые холодильные приборы, торговые и медицинские холодильники и морозильники, медицинские дозированные ингаляторы, средства и системы огнетушения и т. д.). Кигалийская поправка вступила с силу 1 января 2019 г. и является обязательным международным соглашением.

Новое холодильное оборудование на R22 уже запрещено в США, разрешено сервисное обслуживание этих установок. В Европе тоже введен запрет на R22, хотя временно разрешено рециклирование. Европа ввела регулирование всех газов, содержащих атомы фтора (так называемых F-газов) [4]. Заменяется R134a в системах кондиционирования воздуха в автомобилях на хладагенты с ПГП менее 150, хотя ПГП R134a почти в семь раз меньше потенциала глобального потепления R12. Хладагент R32 (ПГП = 674) рассматривается как замена хладагентов R410A, R134a и R152a. С применением R32 связывают надежды для сплит-систем и тепловых насосов. Хладагент R134a заменяют на R152a. Вместо R22 в кондиционерах предлагают R161 (C_2H_5F), хотя R32 и R152a (табл. 2), как и R161 – пожароопасны. Пропан (хладагент R290) начали заправлять в оконные кондиционеры и сплит-системы. Заправка пропаном почти вдвое ниже, чем у систем с R22, а в холодильном шкафу, где в тридцатых годах XX века было 250 г пропана, сегодня в герметичном исполнении шкафа – всего 25 г этого хладагента.

Разумеется, идеальными решением могут стать природные хладагенты, поскольку климат и его изменение, будь это потепление или похолодание, без сомнения, сохранят свою актуальность в технологиях техники низких температур на обозримый период, а вопросы энергоэффективности и экологии уже не уйдут со сцены, несмотря на сложности регламентного характера, не говоря уже о стандартах перехода к природным хладагентам. Диоксид углерода как природный хладагент, обладающий минимальным ПГП, востребован во впечатляющих масштабах. Каскадные схемы, где на верхней ступени раньше «трудился» R134a, а на нижней – диоксид углерода, уступили место транскритическим циклам на базе CO_2. Это уже не единичные

решения: количество подобных схем, включая современные гипермаркеты, – тысячи, а масштаб внедрения именно транскритических систем нарастает [5].

Созданы системы (miniref) с минимальной заправкой аммиака [6]. Заправка аммиака на один кВт производимого холода в этих установках достигает 0,25–0,1 кг, т. е. на 100-киловатную установку расходуется всего 25-10 кг аммиака. Подобные решения реализованы в «тепловых» трубах для замораживания скважин и термосвай, в складских помещениях, на объектах нефтегазодобычи, для охлаждения дата-центров. Термодинамической эффективности аммиачных установок в сравнении с установками на гидрофторуглеродах можно позавидовать, а непреклонность требований сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу делают такие системы альтернативой традиционным решениям.

Эксперты по изменению климата (IPCC) настаивают на двукратном снижении выбросов парниковых газов в глобальном масштабе. Если к 2050 году этого не произойдет, нас может ожидать каждые три года экстремальные климатические явления, а с 2070 – ежегодные. К ним относят волны жары, засухи, наводнения, увеличение или уменьшение особо холодных дней. Представители «Гринписа» считают это «ослабленным компромиссом», поскольку ситуация с климатом, по их мнению, еще более тревожна [7].

Альтернативой ГФУ-хладагентам с высоким потенциалом глобального потепления стали непредельные ГФУ, так называемые, гидрофторолефины (ГФО). Гидрофторолефины, созданные впервые на базе молекулы пропилена (R1270), имеют двойную углерод-углеродную связь [8]. Двойная углерод-углеродная связь обусловила их высокую реактивность, нестабильность в атмосфере и незначительный потенциал глобального потепления (табл. 3). О присутствии в молекуле атомов хлора, фтора и водорода говорят буквы *x, y* и *z* соответственно, а наличие букв *e, f* и *d* означает наличие групп =CHF, $=CH_2$ и =CHCl соответственно. Благодаря короткому времени жизни в атмосфере гидрохлорфторолефины (ГХФО-изомеры) не включены в список озоноразрушающих веществ. Продукт разрушения олефинов – трифторуксусная кислота (TFA), причем ГФО производят ее в 4-5 раз больше, чем ГФУ. В случае пожара, а ГФО по горючести отнесены к классу A2L (слабогорючие), возможно образование токсичных для человека фтористого водорода (HF) и фторфосгена (COF_2) [9]. Предельная концентрация в воздухе составляет 30 ppm для фтористого водорода и 1 ppm – для фторфосгена. Потенциальные риски существуют, таким образом, но они не стали препятствием для все более широкого распространения ГФО- и ГХФО-изомеров. Разрешены смеси ГФО и ГХФО с R32, R134a, с диоксидом углерода (R744), R125. Их рассматривают как альтернативы R22, R404A, R410A, R407C и R134a [10, 11] (таб. 3).

Таблица 3

Молекулярная масса (*M*), температура кипения при нормальном давлении (T_0) и критические параметры хладагентов ГФО-класса

ГФО	*M*, кг·кмоль$^{-1}$	T_0, K	$T_{кр}$, K	$p_{кр}$, MPa	ПГП
R1234yf	114,04	243,70	367,85	3,3822	<1
R1234ze(E)	114,04	254,18	382,51	3,6349	6
R1234ze (Z)	114,04	282,90	423,27	3,5330	1,4
R1233zd(E)	130,50	291,11	439,60	3,6237	7

Литература

1. UNEP. 1987 with subsequent amendments. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozon Layer. Nairobi, Kenya, UNEP, 1987.
2. UN. 1997. Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change. NY, USA.
3. International milestone agreement on the phase-down of HFC production and consumption in Kigali. Editorial// Int. J. Refrigeration. – 2017. – Vol. 73. – P. V-VI.
4. Kauffeld M. Availability of low GWP alternatives to HFCs feasibility of an large phase-out of HFCs by 2020. EIA report (Environmental Investigation Agency). May 2012.
5. Ma Y., Liu Z., Tian H. A review of transcritical carbon dioxide heat pump and refrigeration cycle// Energy. – 2013. – Vol. 55. – P.156-172.
6. Person A., Refrigeration with ammonia// Int. J. Refrigeration. – 2008. – Vol. 31. – P. 545-551.
7. IPCC. 2007. Climate Change 2007. UK, Cambridge, University Press.
8. Brown J.S. HFOs-new, low global warming potentials refrigerants// ASHRAE-Journal. – 2009. – August. – 51(8). – P. 22-29.
9. Schuster P., Bertermann R., Rusch G. M., Dekant W. Biotransformation of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) in rabbits. Toxicology and Applied Pharmacology. Vol. 244, Issue 3, 2010. – P. 247-253.
10. Kamiaka T., Dang C., Hihara E. VLE measurements for binary mixtures of R 1234 yf with R32, R125 and R134a// Int. J. Refrigeration. – 2013. – Vol. 36. –P. 965-971.
11. Gremashi L., Wu X., Biswas A., Decker P. Experimental study of compressor operating characteristics and performance when using R32, R1234yf and two new low GWP refrigerantns as drop-in replacements for R410A// 8th Int. conference on Compressors, 9-10 September 2013, London, UK.

УДК 536

RESULTS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF GUAVA FRUIT OF SOUTHEAST ASIA

Aye Tun, I.V. Baranov, V.A. Krylov, E.V. Tambulatova

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

ayetunitmo@gmail.com

Abstract
This study aimed to present results of the effect of temperature on thermo-physical properties of guava fruit of Southeast Asia. Guava is an energetic fruit with high nutritional value and is considered a tropical fruit of South-east Asia. Fruit growers need to use cold storage facilities to extend the revenue period while maintaining produce quality and freshness. The storage life of fresh fruits can be extended by several days by cooling. The specific heat of foods can be used to calculate the refrigeration load calculation. Therefore, the specific heat of food plays an important role in the design of storage and transport systems. One of the most important thermo-physical properties in foods is specific heat. The authors of the article used differential scanning calorimetry (DSC 204 F1), by which the specific heat of guava fruit was determined in the temperature range from –25 to 25ºC. It was found that the specific heat of guava fruit is dependent on temperature.
keywords: thermo-physical properties, specific heat, DSC method, tropical fruit

1. Introduction

Tropical and Subtropical fruits are very popular among the many countries of the world. Southeast Asia, a typical tropical region, plays an important role in exporting a variety of fruits worldwide [1]. In Southeast Asia, there are tropical and subtropical fruits such as dragon fruit (pitaya or pitahaya), coconut, banana, rambutan, pomelo, mango, mangosteen, jackfruit, guava, longan, papaya, pineapple, watermelon, sapodilla, durian, avocado and carambola. Guavas (Psidium guajava L.) are fruits of commercial and nutritional values. Guava fruit is generally ovoid or pear shaped and depending on cultivar, their sizes vary from 2.5 to 10 cm in diameter and weight 50 to 500 g. The flesh may be pink, white or yellow, either with seed or seedless [2]. Guava (Psidium guajava L.) is often marketed as "super-fruits" which has a considerable nutritional importance in terms of vitamins A and C with seeds that are rich in omega-3, omega-6 poly-unsaturated fatty acids and especially dietary fiber, riboflavin, as well as in proteins, and mineral salts. The high content of vitamin C (ascorbic acid) in guava makes it a powerhouse in combating free radicals and oxidation that are key enemies that cause many degenerative diseases and that can be used to fortify children foods. The anti-oxidant virtue in guavas is believed to help reduce the risk of cancers of the stomach, esophagus, larynx, oral cavity and pancreas [3]. Guava can be consumed fresh or can be processed into juice, nectar, pulp, jam, jelly, and slices in syrup, fruit bar or dehydrated products, as well as being used as an additive to other fruit juices or pulps [4].

Export of tropical fruits has limitations such as a short shelf life and difficulty in maintaining the quality because of tropical climate conditions and undeveloped postharvest technologies in Southeast Asia [1]. An important objective for developing postharvest technologies is to extend the shelf life of fresh fruits without deterioration in fruit quality. The storage life of fresh fruits can be extended by several days by cooling and by several weeks or months by freezing. Fruits and vegetables are perishable foods with extremely rapid

deterioration; this means that their stability after harvesting and during sub-sequent storage is critical (Canet, 1989). Cooling at the field before the product is shipped to the market or storage warehouse is referred to as precooling (Cengel et al). Precooling is the rapid removal of field heat from freshly harvested fruits and vegetables before shipping, storage, or processing. Prompt precooling inhibits growth of microorganisms that cause decay, reduces enzymatic and respiratory activity, and reduces moisture loss. Thus, proper precooling reduces spoilage and retards loss of preharvest freshness and quality (Becker and Fricke 2002). The cooling method is requirements during the transportation, storage, or processing of fruits. Cooling is one of the main tools for extending postharvest life: slow product metabolism and the activity of microorganisms responsible for quality deterioration. As a result, reserves are maintained with a lower respiration rate, ripening is retarded and vapor pressure between products and ambient is minimized, reducing water loss. During cooling and precooling operation, we need to be able to calculate processing times and heat loads of the product.

Thermo-physical properties of foods play a great role in heat transfer calculations of food processing. Thermo-physical properties of foods are included specific heat, enthalpy, thermal conductivity, thermal diffusivity and density. One of the most important thermo-physical properties in food processing is specific heat. Specific heat is an essential part of the thermal analysis of food processing or of the equipment used in heating or cooling of foods. Specific heat of food product is majority of the refrigeration load calculation. Specific heat is a measure of the energy required to change the temperature of a food by one degree. Specific heat of foods materials needed for analysis and design processes involving heat transfer. These processes include cooling, freezing, heating and drying as found in post-harvest handlings and product processing, storage and distribution. The accurate specific heat data will allow food scientists and engineers to calculate the heat transfer precisely leading to the effective food process design including equipment design and implementation. The specific heat depends on the nature of the process of heat addition in terms of either a constant pressure process or a constant volume process. However, because specific heats of solids and liquids do not depend on pressure much, except extremely high pressures, and because pressure changes in heat transfer problems of agricultural materials are usually small, the specific heat at constant pressure is considered (Mohsenin, 1980).

According to Mohsenin (1980), there are several methods of determining specific heat of food and agricultural materials: Empirical equations, Method of mixtures, Method of guarded-plate, Method of comparison calorimeter, Method of calculated specific heat, adiabatic calorimeter and Method of differential scanning calorimetry. Values of specific heat determination of many food materials, using DSC have been reported for various researchers. Among the published methods for specific heat measurement, differential scanning calorimetry (DSC) has so far been the most accurate and rapid method (Yang *et al*., 2002).

This study proposes the result of study on specific heat of guava fruit using differential scanning calorimeter (DSC). Differential scanning calorimeter (DSC), which reports heat flow as a function of temperature is an excellent tool for the measurement of temperature-dependent specific heat and phase transitions (Serpil Sahin et al, 2006). Differential scanning calorimetry means the measurement of the change of difference in the heat flow rate to the sample and to a reference sample while they are subjected to a controlled temperature program (G.W.H. Höhne et al, 2003). Differential scanning calorimetry determines transition temperatures and enthalpy changes in solids and liquids under controlled temperature change. DSC is the most frequently used method in the field of Thermal Analysis. Rapid analysis, high significance for research and quality control tasks, and easy handling of the measuring instrument contribute to its versatility.

This paper presents a results of the effect of temperature on specific heat of guava fruit of myanmar using differential scanning calorimetry DSC 204 F1.

2. Materials and methods

Differential scanning calorimetry DSC 204 F1 phoenix (NETZSCH Germany) was used to determine the specific heat of guava fruit of Southeast Asia. The mass of the samples was measured using an analytical balance AND HR-200, accuracy class. The mass of the crucible is 38 mg, the mass of the lid is 25 mg. The samples were kept in refrigerator at about 5°C until experiments performed. About 28-42 mg of samples are used in the experiments. The samples were cut into small pieces by a snap off blade to obtain 6 mm-diameter and thickness 1-2 mm. Samples were hermetically sealed in aluminum crucibles. The mass of the samples was determined with an accuracy of ± 0.1 mg. The measurements were carried out in the temperature range of -25 to 25 ° C in an atmosphere of gaseous nitrogen. The heating rate was 2 K/min. As a thermally inert substance (reference), sapphire weighing 50.1 mg was used. The tests were carried out in triplicate, following a similar experimental procedure described by DSC method for specific heat determination.

The method for determining the specific heat of the oils under study included four steps:

1. *Setting the temperature program*. In accordance with the specified temperature range from -25 to 25 ° C, a temperature program was drawn up for studying the specific heat of guava fruit.

The heating/cooling rate is 2 K/min, the stationary section time is 15 min, the initial stage lasted 15 min. Nitrogen gas with a flow rate of 20 ml/min and 50 ml/min, respectively, was used as the purge and protective gases [6].

2. *Correction.* On both cells are placed empty crucibles. The difference of heat fluxes through two empty crucibles (DSC = DSC_{base}) and the temperature of the right crucible are measured [7].

3. *Calibration.* Crucible cell comparison remains empty. A substance is placed in the sample crucible with a known Specific heat $c_{p,\ standard}$ and mass $m_{standard}$. The difference between the heat fluxes through the empty crucible and the crucible with the reference standard $DSC_{standard}$, and the temperature of the crucible with the reference is measured. The dependences of signals (DSC = $DSC_{standard}$ — DSC_{bases}) on time and temperature [8].

4. *Measurement.* The crucible of the reference cell remains empty. In the crucible for the sample is placed the test sample mass m_{sample}. The difference between the heat fluxes through the empty crucible and the crucible with the sample DSC_{sample} is measured, and the temperature of the crucible with the sample. The dependences of the signals (DSC = $DSC_{sample} - DSC_{base}$) on time and temperature [9].

The specific heat (c_p) was measured by DSC. The measurement was conducted using DSC method according to equation (1) [5]:

$$\frac{DSC_{sample} - DSC_{base}}{DSC_{standard} - DSC_{base}} = \frac{c_{P\ sample} \times m_{sample}}{c_{P\ standard} \times m_{standard}} \quad (1)$$

$$c_{P\ sample} = \frac{m_{standard}}{m_{sample}} \frac{DSC_{sample} - DSC_{base}}{DSC_{standard} - DSC_{base}} c_{P\ standard} \quad (2)$$

DSC_{sample} , DSC_{base}, $DSC_{standard}$ are the ordinate of the DSC curves corresponding to the sample, blank specimen, and standard specimen, respectively. $c_{p,\ sample}$ and $c_{p,\ standard}$ are the specific heat of the sample and standard specimen, respectively. m_{sample} and $m_{standard}$ are the mass of the sample and sapphire, respectively [11].

3. Results and discussion

The following results on specific heat of guava fruit were obtained in the experiment carried out in the thermo-physical measurements and devices laboratory (ITMO University), Saint Petersburg. The specific heat of guava fruit was determined using differential scanning calorimetry (DSC 204 F1). NETZSCH Software Proteus® 6.1.0 was installed in system for evaluating the data. This study guava fruits samples (11-13 and 21-23) were used 41.1, 28.1, 30.5, 31.5, 30.7 and 36.0 mg obtained from Myanmar and Thailand. The changes in the specific heat of guava fruit at different temperature ranges are presented in Figs 1-2, respectively. From these figures, it can be seen that the specific heat for the all samples of guava fruit increased with increased temperature, then dramatically decreased with increased temperature and slightly decreased with increased temperature, respectively.

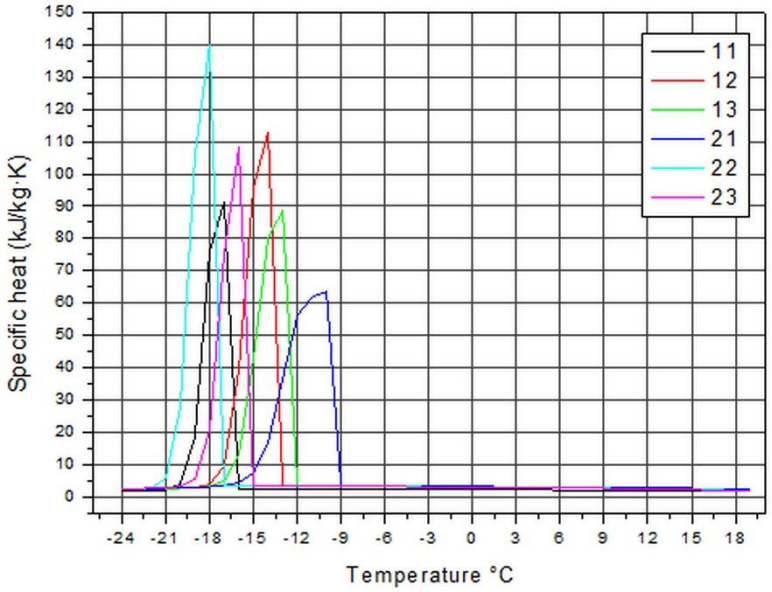


Fig. 1. The effect of temperature on specific heat for the all samples of guava fruit

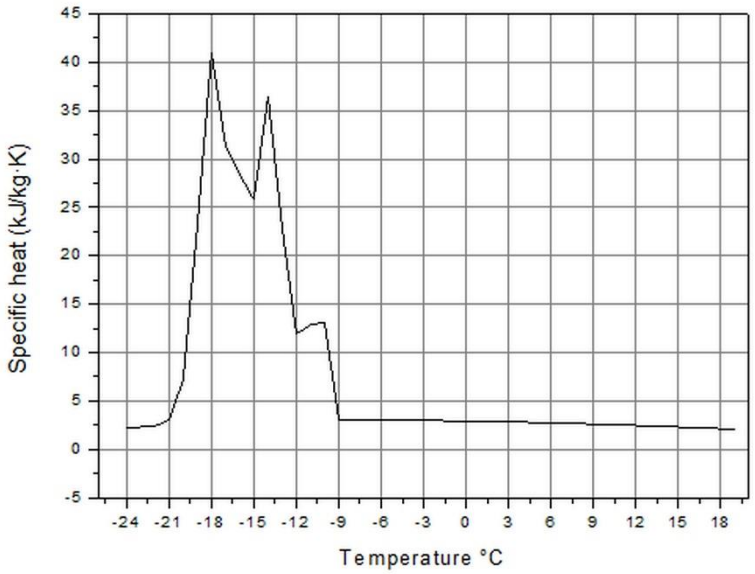


Fig. 2. Approximating the arithmetic mean of specific heat of guava fruit

4. Conclusion

In designing food processes and processing equipment, we need numerical values for the specific heat of the food and materials to be used. Several experimental studies on determination of specific heat of foods and agricultural materials were reported in literature. However, the data depend on origin (variety, cultivar) and composition, processing conditions, and structure of the foods. The specific heat for the all samples of guava fruit increased with increased temperature, then dramatically decreased with increased temperature and slightly decreased with increased temperature, respectively. The linear decrease of specific heat for the all samples of guava fruit at temperature rises from -9°C to 19°C. In literature [10, 12, 13] specific heats of food depend on their composition, structure and temperature. It was found that the specific heat of guava fruit is dependent on temperature. Specific heat of unfrozen foods slightly lower as the temperature rises from 0°C to 20°C (ASHRAE handbook, 2018).

Acknowledgments

This research project was supported by the Research lab (Thermo-physical measurements and devices), Faculty of Physics and engineering, ITMO University.

References

1. Dewi Kusumaningrum, Seung-Hyun Lee, Wang-Hee Lee, Changyeun Mo, Byoung-Kwan Cho, 2015, A Review of Technologies to Prolong the Shelf Life of Fresh Tropical Fruits in Southeast Asia, Journal of Biosystems Engineering, 40(4):345-358 p.
2. S. Yusof Guavas, B. In Caballero, P. Finglas and L. Trugo (Eds), 2003, Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition," 2 nd ed., p. 2985-2992. Academic Press.
3. Lim Y. Y., and Murtijaya J., 2007, Antioxidant properties of *Phyllanthus amarus* extracts as affected by different drying methods, Lwt-Food Science and Technology. 40 (9): 1664-1669.
4. M. Dattatreya Kadam, Pratibha Kaushik, Ramesh Kumar, 2012, Evaluation of Guava Products Quality, International Journal of Food Science and Nutrition Engineering, 2(1): 7-11.
5. Fedorov A.V., Baranov I.V., Tambulatova E.V., Volkov S.M., Prokhorova L.T. and Krylov V.A., 2019, Investigating the temperature dependence of refned sunflower oil specifc heat capacity on its composition by the method of differential scanning Calorimetry, Journal of IAR № 1, 2019. St-Petersburg. 52-63 p.
6. Netzsch-Gerätebau GmbH, 2012), Differential scanning calorimetry: Method, technique, application. DSC 204 Phoenix F1. Germany. 24 p.
7. Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar, 2014, Heat and mass transfer: fundamentals & applications, 5th edition. New York. pp. 1149-1208 (web chapter).
8. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, 2018, ASHRAE Handbook 2018 – Refrigeration, SI Edition.. Atlanta. pp. 343-445.
9. Yang W., Sokhansanj S., Tang J. And Winter P, 2002, Determination of Thermal Conductivity, Specific Heat and Thermal Diffusivity of Borage Seeds. Biosystems Engineering. pp. 169–176.
10. R. Paul Singh, Dennis R. Heldman, 2009, Introduction to Food Engineering, 4th Edition. Amsterdam, Elsevier. pp. 257-262.
11. Höhne G.W.H., Hemminger W.F. and Flammersheim Y.-J., 2003, Differential Scanning Calorimetry. Berlin, Springer Verlag, pp. 1-27.
12. M. J. Lewis. (1987). Physical properties of foods and food processing systems. Cambridge. pp. 220-245.

13. Serpil Sahin and Servet Gulum Sumnu, 2006, Physical Properties of Foods, New York, pp. 118-166.

АЛФАВИТНЫЙУКАЗАТЕЛЬ

А

Алдияров А.У., 279
Алексеев А.П., 309
Алёшичев С.Е., 140
Альхименко А.А., 113
Ананьев В.В., 56
Андреев А.К., 88, 119
Анохин А.В., 175
Апицына О.С., 24
Асач А.В., 304, 318

Б

Байрамов Д.З., 17
Балюбаш В.А., 140
Бараненко А.В., 35, 44, 77
Бараненко Д.А., 12
Баранов А.Ю., 179, 181, 193, 204, 234, 238
Барахтин Б.К., 103
Березин Н.М., 88
Беспалов В.Н., 12
Божедомов А.В., 243
Боровской А.С., 7
Бородулин Д.М., 3
Буянова И.В., 298

В

Валентинова К.А., 184
Василенок А.В., 179
Веденский В.О., 162
Вологжанина С.А., 96, 100, 108, 125

Г

Галимова Л.В., 17
Герасютенко В.В., 287
Глушаев А.В., 189, 234
Глушков И.А., 268
Грановский А.С., 77
Гуринович Г.В., 298

Д

Давыденко М.И., 193
Данилов М.М., 24
Долговская О.В., 254
Дрозд В.Г., 157, 170

Е

Ермаков Б.С., 92, 108, 113, 119, 125
Ермаков С.Б., 108, 113, 119
Ермолаев В.А., 30, 32

Ж

Жекписов Т.М., 199
Жигновская Д.В., 243

З

Зайцев А.В., 51, 175
Зайцева Т.С., 230
Замарашкина В.Н., 212
Захарова В.Ю., 35

И

Иванов В.Л., 140, 146, 149, 157, 170
Иванов Л.В., 204
Иванушкина О.В., 268
Ивашин А.А., 209
Иголкин А.Ф., 96, 100, 113
Ильина В.С., 12
Исаченко Г.Н., 294

К

Каблукова Н.С., 304
Кали Д., 146
Касьянов А.А., 294
Касьянов А.В., 44
Каялайнен А.В., 287
Когай Г.Д., 157, 170
Кожевников В.А., 125
Коломийцева А.В., 279
Конькин А.В., 309
Кораблев В.А., 287
Котлярова М.В., 298
Кочетов А.С., 82
Круглов А.А., 40
Куадио К.Ф., 51
Кузнецов П.А., 35
Кутьянова Л.Р., 181

Л

Лазарев В.Л., 162
Лаптев Ю.А., 323
Лебедева Н.В., 103
Лепешкин А.И., 12
Лобанов В.Р., 212

М

Макарова Е.С., 304, 318
Малашихина В.М., 215
Малинина О.С., 44, 51
Малышев А.А., 51
Медведева М.В., 103
Мигай С.А., 219
Миникаев А.Ф., 243
Минкин Д.А., 287
Митропов В.В., 72, 323
Москаленко А.С., 69
Муравейников С.С., 258, 263

Н

Надточий Л.А., 12
Никитин А.А., 72, 263, 323
Новотельнова А.В., 304, 315, 318
Носков А.Н., 59

П

Павленко А., 108
Павлов К.С., 69
Пахомов О.В., 69
Перегудов А.А., 96
Плотников И.Б., 134
Плотников К.Б., 134
Плотникова И.О., 134
Поляков Р.И., 149
Попов А.М., 134
Пронин В.А., 243, 254
Пряхин Е.И., 129

Р

Рахманов Ю.А., 323
Рачковский Н.О., 64
Рогозина Е.А., 12
Романов В.В., 125
Рыжкова А.А., 209
Рябова Т.В., 258, 263

С

Салей П.А., 103
Самвелов А.В., 69
Самусевич К.Л., 294
Семенов А.А., 243
Середенко Е.С., 225
Серов А.А., 271
Серяков А.В., 309
Сигачёва В.В., 166
Соколов Д.Ю., 279
Соколова Е.В., 209, 230
Сулин А.Б., 258, 263
Сунь Чжаоян, 146
Сухоруков Д.В., 3

Т

Таева А.М., 298
Тазитдинов Р.Р., 40
Талызин М.С., 82
Татаренко Ю.В., 64, 72
Те А.Л., 157, 170
Тен Т.Л., 157, 170
Тимофеевский А.Л., 268
Титова Т.И., 7
Травина Е.А., 140, 146, 149
Тукмакова А.С., 315
Тхоржевский И.Л., 304, 318

Ф

Федотова Ю.О., 12
Файзуллин Р.О., 35
Филькин Н.Ю., 248
Фомин В.Е., 304, 318

Х

Хасанов А.Р., 92
Хасанова Е.О., 92
Хрустовская Д.А., 234

Ц

Цветков О.Б., 323
Цой А.П., 77
Цой Д.А., 77
Цупка С.А., 100
Цыганков А.В., 271

Ч

Черкашина Д.К., 3
Чечеткина А.Ю., 12
Ш

Шапошников Н.О., 113
Шапошникова М., 59
Шарапова Д.М., 129
Шарков А.В., 287, 323
Шатский Т.Е., 113
Шестопалова И.А., 12
Шилин А.С., 273
Штельмах К.Ф., 125
Шульган Н.А., 7

Щ

Щеглова Д.Б., 315

Ю

Юша В.Л., 248

Я

Ярославова Ю.Э., 238
Ясев С.Г., 69

A
Aye Tun. 328

B
Baranov I.V.. 328

K
Krylov V.A.. 328

T
Tambulatova E.V. 328

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕЗАСЕДАНИЕ

Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Черкашина Д.К.
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШНЕКОВОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МУЧНЫХ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ СМЕСЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ…….3

Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С.
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ…….7

Бараненко Д.А., Надточий Л.А., Беспалов В.Н., Федотова Ю.О., Шестопалова И.А., Чечеткина А.Ю., Лепешкин А.И., Ильина В.С., Рогозина Е.А.
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ НЕИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ…….12

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕХНИКА И СИСТЕМЫ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Байрамов Д.З., Галимова Л.В.
АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ……..…..17

Данилов М.М., Апицына О.С.
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА……..…24

Ермолаев В.А.
ОЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА СМЕШАННЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ АГЕНТОМ…….30

Ермолаев В.А.
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ СПИРУЛИНЫ……32

Захарова В.Ю., Кузнецов П.А., Бараненко А.В., Файзуллин Р.О.
К РАСЧЕТУ АККУМУЛЯТОРОВ ХОЛОДА С ВЕЩЕСТВАМИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ……...35

Круглов А.А., Тазитдинов Р.Р.
РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
ВОДЫ В ФАКЕЛЕ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ В ВАКУУМЕ……..…….40

Малинина О.С., Касьянов А.В., Бараненко А.В.
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ
ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМИ ПРОЦЕССАМИ
АБСОРБЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ СО СВЯЗАННЫМ ПОТОКОМ МАССЫ……...44

Малышев А.А., Куадио К.Ф., Малинина О.С., Зайцев А.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СКОЛЬЖЕНИЯ ФАЗ И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ
ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A В МИНИКАНАЛЕ……...….51

Ананьев В.В.
ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОР МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ …….56

Носков А.Н., Шапошникова М.
УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВ
ХОЛОДИЛЬНОГО ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА…….……59

Рачковский Н.О., Татаренко Ю.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО НАСОСА
В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА……...64

Самвелов А.В., Ясев С.Г., Пахомов О.В., Москаленко А.С., Павлов К.С.
ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ФОТОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВ……..……69

Татаренко Ю.В., Митропов В.В., Никитин А.А.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
КОМПРЕССОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО АГРЕГАТА……..….72

Цой А.П., Грановский А.С., Цой Д.А., Бараненко А.В.
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО
ЦИКЛА РАБОТЫ УСТАНОВКИ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ…….77

Талызин М.С., Кочетов А.С.
ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА
АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ……...…82

НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЙ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

Березин Н.М., Андреев А.К.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ…….……88

Ермаков Б.С., Хасанов А.Р., Хасанова Е.О.
ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ……..……..92

Перегудов А.А., Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф.
ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ……...……96

Цупка С.А., Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф.
СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
СКЛОННОСТИ МАТЕРИАЛОВ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ……..……..100

Барахтин Б.К., Лебедева Н.В., Медведева М.В., Салей П.А.
АДДИТИВНАЯ СТАЛЬ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ СУДОВОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ…….103

Б.С. Ермаков, С.Б. Ермаков, А. Павленко, С.А. Вологжанина
РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ
ЧАСТИЦ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ РАСПЫЛЕНИИ…….……108

Ермаков Б.С., Альхименко А.А., Шапошников Н.О.,
Ермаков С.Б., Шатский Т.Е., Иголкин А.Ф.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПЫЛЕННЫХ ПОРОШКОВ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ТРУБ
НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ……..…….113

Ермаков С.Б., Ермаков Б.С., Андреев А.К.
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ
В УСЛОВИЯХ МОРСКОГО КЛИМАТА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ……119

Романов В.В., Ермаков Б.С., Кожевников В.А.,
Штельмах К.Ф., Вологжанина С.А.
ЛЕГИРОВАНИЕ ЛАНТАНОИДАМИ КРИСТАЛЛОВ $A^{III}B^{V}$……125

Пряхин Е.И., Шарапова Д.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕМОНТОСПОСОБНОСТИ ХЛАДОСТОЙКОЙ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К70 (Х90)……...……129

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Плотников К.Б., Попов А.М., Плотников И.Б., Плотникова И.О.
ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СЕГРЕГИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНСТАНТИРОВАННЫХ НАПИТКОВ……..…..134

Балюбаш В.А., Алёшичев С.Е., Травина Е.А., Иванов В.Л.
ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ……..……..140

Иванов В.Л., Кали Д., Сунь Чжаоян, Травина Е.А.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ШАМПУНЕЙ…….146

Иванов В.Л., Поляков Р.И., Травина Е.А.
ПРОБЛЕМЫ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ…….....149

Когай Г.Д., Тен Т.Л., Иванов В.Л., Дрозд В.Г., Те А.Л.
ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КАЗАХСТАНА…….157

Лазарев В.Л., Веденский В.О.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ ЭНТРОПИЙНОГО ПОТЕНЦИАЛА……...162

Сигачёва В.В.
СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРОЙ……...……..166

Тен Т.Л., **Иванов В.Л.**, **Когай Г.Д.**, **Дрозд В.Г.**, **Те А.Л.**
СТРУКТУРА МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ……...170

КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)

Анохин А.В., Зайцев А.В.
ОБОСНОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
СНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ СПГ……..175

А.Ю. Баранов, А.В. Василенок
ЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ КРИОСТАТИРОВАНИЯ
ЗОНЫ WBC, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ…….……179

Баранов А.Ю., Кутьянова Л.Р.
КЛАССИЧЕСКИЙ КАСКАДНЫЙ
ЦИКЛ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА……..181

Валентинова К.А.
ЭФФЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ КРУПНОТОННАЖНОГО
РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА……..184

Глушаев А.В.
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОСЕТИ……...…189

Давыденко М.И., Баранов А.Ю.
ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОТУРБИНЫ В КАЧЕСТВЕ
ПРИВОДА ПОГРУЖНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА
ДЛЯ ОТГРУЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
ИЗ КРУПНОТОННАЖНЫХ ХРАНИЛИЩ……..….193

Жекписов Т.М.
ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ……...……199

Иванов Л.В., Баранов А.Ю.
АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ГРУЗА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ
ПРОЕКТА РЕЧНОГО ТАНКЕРА КЛАССА РЕКА-МОРЕ……..204

Ивашин А.А., Рыжкова А.А., Соколова Е.В.
ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ПАРОВОГО ПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА
ДЛЯ ПРОЕКТА "БАЛТИЙСКИЙ СПГ"…….....209

Лобанов В.Р., Замарашкина В.Н.
ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ХРАНИЛИЩ СПГ
ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА…….……..212

Малашихина В.М.
НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ХРАНИЛИЩ МЕМБРАННОГО ТИПА…….215

Мигай С.А.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА
СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ РФ……...….219

Середенко Е.С.
МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)…….…225

Соколова Е.В., Зайцева Т.С.
ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМА
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОГРУЖНОГО НАСОСА ДЛЯ СПГ……...230

Хрустовская Д.А., Баранов А.Ю., Глушаев А.В.
СИСТЕМА КРИОСТАТИРОВАНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СИЛОВОГО КАБЕЛЯ……..234

Ярославова Ю.Э., Баранов А.Ю.
АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРИОГЕННЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИЗОЛЯЦИИ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ЗАВОДОВ КРУПНОТОННАЖНОГО
ПРОИЗВОДСТВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)……238

СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Пронин В.А., Жигновская Д.В., Божедомов А.В., Семенов А.А., Миникаев А.Ф.
ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВКО…….243

Филькин Н.Ю., Юша В.Л.
ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПАРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ……..…248

Пронин В.А., Долговская О.В.
К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАКЕТНОГО
ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА
ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНО ИЗОЛИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ……..254

Сулин А.Б., Рябова Т.В., Муравейников С.С.
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ……...258

Муравейников С.С., Сулин А.Б., Никитин А.А., Рябова Т.В.
ИСПЫТАНИЯ ВСТРАИВАЕМОГО ВОЗДУШНОГО
ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ СПИРАЛЬНОГО
КОМПРЕССОРА DIGITAL SCROLL…….263

Тимофеевский А.Л., Глушков И.А., Иванушкина О.В.
СНИЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ
РИТОЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК
ЗА СЧЕТ АККУМУЛЯЦИИ ХОЛОДА……..268

Серов А.А., Цыганков А.В.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСАДКИ
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В СИСТЕМАХ
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА…….271

Шилин А.С.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ……....273

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛО- И ХЛАДОТЕХНИКА

Коломийцева А.В., Алдияров А.У., Соколов Д.Ю.
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ
ВЕЩЕСТВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ……..279

Герасютенко В.В., Шарков А.В.,
Кораблев В.А., Каялайнен А.В., Минкин Д.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА…….287

Касьянов А.А., Исаченко Г.Н., Самусевич К.Л.
ХОЛОДИЛЬНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРЧИЕСКИЙ
МОДУЛЬ С СИЛИКОНОВЫМИ КОНТАКТАМИ……..…294

Буянова И.В., Гуринович Г.В., Таева А.М., Котлярова М.В.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
И МЕХАНИЗМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ СЫРОВ……...…..298

Макарова Е.С., Каблукова Н.С., Новотельнова А.В., Асач А.В., Тхоржевский И.Л., Фомин В.Е.
СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВИСМУТА И СУРЬМЫ…….....304

Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев А.П.
ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ
ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
КОРОТКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ…….309

Тукмакова А.С., Новотельнова А.В., Щеглова Д.Б.
РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
МАТЕРИАЛА ПРИ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ……..315

Фомин В.Е., Асач А.В., Тхоржевский И.Л., Макарова Е.С., Новотельнова А.В.
ОПЕРАТОРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ…….……...318

Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Никитин А.А., Митропов В.В. Шарков А.В., Рахманов Ю.А.
ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИМПЕРАТИВЫ И ПРИОРИТЕТЫ
ВЫБОРА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ ИНДУСТРИИ ХОЛОДА…….……....323

Aye Tun, I.V. Baranov, V.A. Krylov, E.V. Tambulatova
RESULTS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE
ON THERMO-PHYSICAL PROPERTIES
OF GUAVA FRUIT OF SOUTHEAST ASIA……..…….328

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....334

IX Международная
научно-техническая конференция

«НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В XXI ВЕКЕ»

(Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г.)

Том I
Материалы конференции

Научный редактор О.Б. Цветков

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 07.11.2019

Заказ № 4347 от 07.11.2019

Тираж 50 экз.

Печатается в авторской редакции

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16