

УДК 621.564

Новые тенденции регулирования фторированных хладагентов в индустрии холода*Д-р техн. наук Цветков О.Б., д-р техн. наук Бараненко А.В.,**канд. техн. наук Лаптев Ю.А. max_iar@gunipt.spb.ru**Университет ИТМО**191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9**д-р техн. наук Тимофеев Б.Д. bortim015@mail.ru**ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»**Национальной академии наук Беларуси***Бирин С.А.** birin-sergei@mail.ru*ОАО «Гипрорыбфлот»***Пятаков Г.Л.** giorgiy@mail.ru*ООО «АйСиДжи»*

Современные тенденции и стратегия развития техники низких температур оказались в центре дискуссии, прозвучавшей на Международной конференции в стенах Университета ИТМО в Санкт-Петербурге 4 февраля 2015 г. Необходимы современные решения и технологии в индустрии холода, отвечающие требованиям Монреальского протокола по устранению с 1996 и 2020 годов озоноразрушающих и парниковых газов, прежде всего хлорфторуглеводородов и гидрохлорфторуглеводородов. В рамках Монреальского протокола предполагается постепенный вывод из обращения фторированных углеводородов. Рассмотрены условия перехода на фторированные хладагенты с низким потенциалом глобального потепления: энергоэффективность, изучение теплофизических свойств, снижение утечек и уменьшение количества хладагента в системе, проблемы безопасности и новые технологии на их основе. Необходимы интенсивное развитие научных исследований в университетах и стратегические инициативы компаний по их реализации.

Ключевые слова: низкотемпературная техника, хладагенты, экология, хлорфторуглеводороды, гидрохлорфторуглероды, фторированные газы, потенциал глобального потепления, теплофизические свойства, утечки хладагентов.

New trends in F-gas regulation to refrigeration industry*D. Sc. Tsvetkov O.B., D. Sc. Baranenko A.V.,**Ph. D. Laptev YU.A., max_iar@gunipt.spb.ru**ITMO University**191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9**D. Sc. Timofeev B.D. bortim015@mail.ru**Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, Belarus***Birin S.A.** birin-sergei@mail.ru*ОФО «Giprorybflot»***Pjatakov G.L.** giorgiy@mail.ru*ООО «AiS&Dzhi»*

This paper focuses particularly on modern tendencies and strategies in development of low-temperature engineering discussed at international conference in St. Petersburg (Russia) in February, 2015.

In order to phase out and reduce ozone-depleting and global warming gases, the low-temperature industry and society need modern solutions and modern refrigeration technology.

According to the Montreal Protocol production and consumption of chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) in developed countries are or will be phased out by 1996 and 2020 for CFCs and HCFCs respectively. HCFCs production and consumption would be phased down with the tools of the Montreal Protocol. Key elements to be taken into account when choosing a low-GWP refrigerants: energy efficiency, thermophysical properties, reducing leakage, refrigeration charge reduction, safety issues and new technologies, which requires increasing research in universities and companies.

Key words: low-temperature engineering, refrigerants, environmental challenges, HCFC, CFC, F-gas, low GWP refrigerant, thermophysical properties, leakage.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-08-00541 и 15-08-08503)

В Институте холода и биотехнологий (ИХиБТ) Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) 4 февраля 2015 г. прошла XXXIII научно-техническая конференция с международным участием «Состояние и приоритеты использования ГХФУ, ГФУ и природных хладагентов, снижение их эмиссий и содержания в системах».

Директор Института холода и биотехнологий Университета ИТМО, Президент МАХ **Бараненко А.В.** приветствуя участников конференции, отметил, что холодильная и криогенная техника играет все более значимую роль в хозяйственной, научной и повседневной деятельности человека. Масштабы применения техники низких температур постоянно расширяются. Многие важнейшие технологии не могут развиваться без искусственного охлаждения.

Докладчик анонсировал некоторые значимые для холодильщиков мероприятия 2015 года и призвал активно в них участвовать: в августе месяце в Йокогаме состоится 24-й международный конгресс МИХ, девиз которого – «Улучшение качества жизни, сохранение планеты Земля»; в апреле пройдет 6-я международная конференция «Холодильные системы на аммиаке и диоксиде углерода» в Республике Македония, а в ноябре в Санкт-Петербурге – 7-я МНТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке».

Наша конференция проходит в Санкт-Петербурге уже в 33 раз, и неоднократно на повестке дня стояли судьбоносные экологоэнергетические аспекты низкотемпературной техники, в частности, переход на экологически безопасные и энергетически эффективные рабочие вещества. Бараненко А.В. пожелал участникам конференции успехов и плодотворной работы.

С докладом «Климатические тренды и индустрия холода» выступил **Цветков О.Б.** (Университет ИТМО). Правительство Российской Федерации издало постановление № 228 «О мерах государственного регулирования потребления и обращения веществ, разрушающих озоновый слой». В списке запрещенных гидрофторхлоруглеродов (ГХФУ) 40 веществ, среди которых столь известные хладагенты R22, R123, R141b, R21 и R142b. С 1 января 2015 г. введена нулевая квота на ввоз ГХФУ, обязательны учет и отчетность за обращением этих веществ в стране и лицензирование причастных организаций. Только в России существуют около 10 тысяч предприятий по изготовлению и ремонту холодильных установок и систем кондиционирования, еще примерно тысяча организаций производит пеноматериалы и использует для вспенивания хладагент R141b. Квота, установленная на производство ГХФУ для России с 1 января 2015 года – чуть более 7000 метрических тонн. Для сравнения Китай ежегодно производит 800 тысяч метрических тонн ГХФУ. Не попадает по действие квот две страны Таможенного Союза – Казахстан и Армения.

В Евросоюзе озабочены другой проблемой – гидрофторуглероды (ГФУ). С декабря 2013 года Евросоюз ввел систему сокращения оборота ГФУ в перспективе до 79 % в эквиваленте диоксида углерода

от уровня 2009–2012 годов. В череду сроков этих сокращений под раздачу попали R404A, R507A и R422A, у которых потенциал глобального потепления более 2500. Напомним, что среди всех производимых хладагентов ГФУ-класса почти половину составляет R404A. Сегодня мировой рынок фторсодержащей продукции как никогда активен и предполагает достичь оборота 25 млрд долларов США к 2020 году. 60 % оборота составляют хладагенты ГХФУ-класса, поскольку преобладающую роль начинают играть страны Азиатско-Тихоокеанского региона

Серьезность проблемы климатических катаклизмов – главный лейтмотив прошедшей в Лиме в декабре 2014 года конференции Сторон, подписавших Конвенцию по изменению климата в Рио-де-Жанейро и Киотский протокол 1997 года (COP 20). Чтобы рост температуры не превысил 2 °С от уровня 1906 года, COP 20 призывает полностью отказаться даже от ископаемого топлива к концу XXI века, сохранять леса и парки, развивать экологически чистый транспорт. Черновик нового Киотского протокола ООН обещают подготовить к весне 2015 года, чтобы окончательно принять его на Саммите в декабре 2015 года в Париже. Пока что, по мнению делегатов COP 20, рост выбросов парниковых газов двадцати крупнейших стран мира соответствует тренду роста температуры атмосферы Земли к концу XXI века в +40 °С.

«О комплектации холодильной техникой судов новой постройки в Российской Федерации» рассказал **Бирин С.А.** (ОАО «Гипрорыбфлот»). Стратегия развития судостроения и анализ имеющегося отечественного и зарубежного опыта эксплуатации судов рыбопромыслового флота диктуют необходимость совершенствования систем холодоснабжения с применением экологически безопасных и энергосберегающих методов получения холода на судах. Основной проблемой на сегодняшний день является практически полное отсутствие производства в РФ современного судового холодильного оборудования. Существует большая проблема с выбором хладагентов для низкотемпературной техники. Следует отметить, что наиболее предпочтительной для судостроения является комплектная поставка холодильного оборудования для конкретного судна, включая компрессорные агрегаты, теплообменную и емкостную аппаратуру, запорную и регулирующую арматуру, приборы и средства автоматизации, щиты управления и сигнализации и т. п. Поставщики судового отечественного холодильного оборудования, способные обеспечить комплектную поставку холодильных установок на суда, в настоящее время отсутствуют и для комплектации приходится использовать технику зарубежных фирм. Ориентация же только на импортную технику может привести к возникновению новых проблем. Целесообразно включение в программу импортозамещения Правительства РФ 2015 г. создание отечественной холодильной техники (в т. ч. судовой), а также формировать ее с учетом мнения заинтересованных организаций, в частности, Минсельхоза РФ и Росрыболовства РФ, включая ОАО «Гипрорыбфлот», ученых и специалистов отраслевых вузов, НИИ и предприятий, а также членов Международной академии холода.

На конференции значительный акцент составили доклады по экспериментально-теоретическим исследованиям теплофизических свойств холодильных агентов, процессов теплообмена и гидродинамики в аппаратах низкотемпературной техники. Авторы докладов из Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, (Беларусь), Одесской государственной академии пищевых технологий (Украина), СКТБ релейной техники (Великий Новгород), Московской высшей школы инжиниринга, Университета ИТМО (Санкт-Петербург) рассказали о своих последних исследованиях в этой области [1–23].

В докладе **Черепанова А.Н.** (Московская высшая школа инжиниринга) рассмотрена «Интенсификация теплопередачи при радиационно-кондуктивном теплообмене с фазовым переходом (на примере синтетических жирных кислот)». Проведены теоретические и экспериментальные исследования по сопоставлению эффективности различных способов нагрева и плавления синтетических жирных кислот (СЖК) в крупногабаритных полиэтиленовых контейнерах. Определены характеристики пропускания и поглощения (спектральные и интегральные) жидкой и твердой фазы СЖК. Было найдено, что спектр пропускания жидкой фазы жирных кислот наилучшим образом соответствует спектру излучения гало-

генных ламп непрерывного свечения с границами спектра 0,25–3,5 мкм и с максимумом светимости при 0,8 мкм. Это позволяет использовать для нагрева и плавления СЖК метод облучения в связи с достаточно большой глубиной проникновения излучения сквозь толщу жидкой фазы и, вместе с тем, достаточно эффективным поглощением излучения даже относительно тонкими слоями (3–5 см) жидкой фазы. Большая часть прошедшей мощности излучения при измерении интегрального пропускания относится к длинноволновому излучению (в ближней инфракрасной области спектра ~1–2,5 мкм). По результатам исследований разработана конструкция излучателя, используемого в качестве насадки для контактного погружаемого нагревателя, что обеспечивает максимальные скорости проплавления СЖК при минимальных энергозатратах.

«Результатам экспериментального исследования работоспособности озонобезопасной смеси «Экохол-1» с использованием минерального холодильного масла» посвящен доклад **Тимофеева Б.Д., Нагулы П.К., Зайца Т.А.** (ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны») и **Акулича Д.А.** (ЧП «Хладагент»). На модернизированном теплонасосном стенде ТН-10 проведено исследование работоспособности смеси Экохол-1 (R125/R600a/R134a) для замены хладагента R12 с использованием холодильного минерального масла марки Mobil Cargoyl Arctic Oil300. Регулировкой ТРВ достигнуты температурные значения хладагента на входе в испаритель от –8 до –31 °С. По данным газохроматографических исследований хладагента Экохол-1 до и после проведенных испытаний на стенде ТН-10 наблюдалась стабильность компонентного состава смеси. Данный хладагент предлагается для ускоренного вывода из обращения озонопасных веществ в холодильном оборудовании.

В докладе **Серякова А.В., Ананьева В.И., Орлова А.В.** (ОАО «СКТБ РТ») «Исследование процессов конденсации в низкотемпературных тепловых трубах» представлены результаты экспериментальных исследований процессов конденсации в коротких низкотемпературных тепловых трубах (ТТ), с капиллярно-пористой вставкой и испарителем. Паровой канал сформирован капиллярно-пористой вставкой в виде внутреннего сопла, близкого к соплу Лавалья, вдоль всей длины ТТ. В верхнюю крышку трубки дополнительно установлен емкостный датчик оригинальной конструкции. Применяли две идентичных ТТ с одинаковыми емкостными датчиками, основная из которых заполнена диэтиловым эфиром, а дополнительная – осушенным воздухом с температурой точки росы ниже 233,15 К. Верхние части обеих ТТ помещены в вихревой проточный калориметр, температура и расход воды на входе в который стабилизированы с помощью регулируемого термостата.

Для проведения измерений толщины слоя жидкого конденсата внутри ТТ применен метод регистрации изменений электрической емкости емкостного датчика.

Применяя градуировочную характеристику емкостного датчика и полученную зависимость емкость датчика – разностная частота опорного и измерительного генераторов, проведены измерения усредненных во времени значений толщины слоя диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель. Получена нелинейная зависимость толщины слоя жидкого конденсата от величины перегрева испарителя ТТ, при абсолютной погрешности измерений толщины менее 0,001 мм.

Сообщение **Макеевой Е.Н.** (Гомельский ГТУ) посвящено «Экспериментальному исследованию процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях». Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при пузырьковом кипении хладагентов R404A, R407C и R410A на оребренной трубе. Эксперименты проводились при температурах насыщения 13–28,5 °С. Рекомендованы эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении в условиях большого объема, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными с погрешностью 15–20 %.

Экспериментально и теоретически установлено, что при развитом пузырьковом кипении интенсивность теплоотдачи не зависит от типа и профиля неизотермической оребренной поверхности, а определяется только режимными параметрами, теплофизическими свойствами жидкости, геометриче-

скими размерами поверхности и внутренними характеристиками процесса кипения. Коэффициенты теплоотдачи при кипении фреонов на ребристой поверхности значительно выше, чем на гладкой, т. е. при развитом пузырьковом режиме кипения теплообмен на ребренных поверхностях в 2–4 раза выше, чем на неразвитой поверхности.

Никулин А.Г., Семенюк Ю.В., Железный В.П. (Одесская НАПТ) в своем докладе оценили «Применение модели разделения тепловых потоков (RPI) для прогнозирования коэффициента теплоотдачи чистых веществ и нанофлюидов при кипении в свободном объеме». Проведены моделирование и анализ процесса переноса тепла при пузырьковом кипении хладагента R11, изопропанола и нанофлюидов – изопропанол/ Al_2O_3 в свободном объеме. В качестве базового уравнения была принята модель RPI (Rensselaer Polytechnic Institute). Данная модель была применена для изучения процессов пузырькового кипения нанофлюидов в свободном объеме и основана на схеме отдельного учета различных механизмов переноса тепла при кипении, таких как: теплота испарения, расходуемая на образование пузырей; теплота на восстановление теплового пограничного слоя после отрыва пузыря; теплота, передаваемая жидкости за счет конвекции за пределами области влияния пузырей.

Показано, что применение модели RPI с использованием информации об отрывном диаметре пузырей и плотности центров парообразования позволяет рассчитывать коэффициент теплоотдачи чистых веществ и нанофлюидов с относительными отклонениями, не превышающими 10 %.

«Расчет состава поверхностного слоя смесей криогенных жидкостей в рамках градиентной теории» выполнен в докладе **Железного В.П. и Севастьяновой Т.Д.** (Одесская НАПТ). В рамках градиентной теории в одножидкостном приближении для бинарных растворов азота в аргоне и криптона в ксеноне показано, что поверхностный слой жидкой фазы имеет состав, отличающийся от состава в объемной фазе. Исследованы зависимости плотности растворов в поверхностном слое жидкостей, а также значения эффективного состава поверхностного слоя растворов. Именно этот состав раствора, а не состав объемной жидкой фазы, должен учитываться при интерпретации получаемых в эксперименте данные по давлению насыщенных паров и поверхностному натяжению растворов. Показано, что разница между концентрациями компонента в поверхностном слое и в объемной жидкой фазе рассмотренных растворов увеличивается с ростом температуры. Предложена двухслойная модель поверхностного слоя растворов.

«Учет неравномерности температурного поля в геотермальной скважине теплового насоса» выполнили в своем докладе **Крылов В.А., Черноозерский В.А., Никитин А.А. и Баранов И.В.** (Университет ИТМО). Одним из решений проблемы истощения ископаемого топлива и рационального использования топливно-энергетических ресурсов является использование низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. Устройством переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии к потребителю теплоты является тепловой насос. Одним из основных элементов теплонасосной системы, использующей теплоту грунта, служит геотермальный теплообменник, который бывает двух типов: горизонтальный и вертикальный. Горизонтальные теплообменники наиболее подвержены влиянию сезонных и суточных изменений интенсивности солнечной радиации, температуры наружного воздуха и выпадающих осадков, так как глубина их залегания не превышает 1,5 м. Вертикальные теплообменники располагаются на глубине порядка 10–100 м, что позволяет не учитывать изменения сезонных и, тем более, суточных параметров наружного климата.

Производители теплонасосных систем рекомендуют при расчетах принимать величину удельного теплового потока с одного погонного метра скважины в диапазоне от 20 до 150 Вт/м. Сложности моделирования процессов, связанных с отбором теплоты от грунта обусловлены отсутствием адекватных моделей и корректных методик проектирования геотермальных теплонасосных систем. Авторами предложена трехмерная параметрическая модель экспериментального стенда, основанная на модуле Flow Simulation программного комплекса SolidWorks, что позволило на основе метода конечных элементов выполнить расчет распределения температурных полей в модулируемой скважине в грунте.

Рыков С.В., Полторацкий М.И. (Университет ИТМО) рассмотрели «Метод построения скейлингового уравнения состояния, не содержащего интегралов от дифференциальных биномов». В основе метода лежит феноменологическая теория критических явлений и гипотеза об одинаковом характере поведения изохорной теплоемкости на критической и околокритических изохорах в асимптотической окрестности критической точки. Показано, что непараметрическое масштабное уравнение состояния, разработанное в рамках данного подхода, по своим характеристикам не уступает линейной модели Скофилда–Литстера–Хо.

В докладе **Кудрявцевой И.В. и Селиной Е.Г.** (Университет ИТМО) для описания «Линии фазового равновесия хладагента R1234yf» от тройной до критической точки предложена система взаимосогласованных уравнений, разработанная на базе масштабной теории критических явлений и уравнения Клапейрона–Клаузиуса. Рассчитана плотность на паровой и жидкостной ветвях линии насыщения, давление на линии упругости и теплота парообразования R1234yf.

На основе метода псевдокритических точек в диапазоне температур от тройной точки до 435 К и по давлению до 70 МПа разработано физически обоснованное «Неаналитическое уравнение состояния хладагента R32» (**Рыков В.А., Карпов Г.А.** (Университет ИТМО)). Рассчитаны таблицы термодинамических свойств на линии фазового равновесия и в однофазной области, включая околокритическую. Таблицы включают данные о температуре, давлении, плотности, изохорной и изобарной теплоемкости, энтальпии, энтропии и скорости звука в указанном диапазоне параметров состояния.

Малышев А.А., Мамченко В.О., Мизин В.М., Киссер К.В. (Университет ИТМО) представили доклад «Перспективные типы теплообменных аппаратов холодильных машин». Проанализированы конструкции и теплотехнические характеристики современных теплообменных аппаратов, используемых в качестве испарителей и конденсаторов холодильных машин, рассмотрены их наиболее перспективные типы.

Значительная доля выпускаемого теплообменного оборудования холодильной техники приходится на кожухотрубные теплообменные аппараты. Интенсификация конвективного теплообмена при кипении в кожухотрубных испарителях затопленного типа может быть достигнута увеличением скорости двухфазного потока хладагента. Оребрение труб пучка позволяет увеличить общую площадь поверхности конденсации в кожухотрубных конденсаторах, а также использовать силы поверхностного натяжения, которые сдвигают образующуюся пленку конденсата к основанию ребер. В испарителях с внутриканальным кипением хладагентов внутри труб и каналов кипение внутри каналов происходит в стесненных условиях, что обуславливает разнообразие режимов течения: пузырьковый, снарядный, кольцевой и эмульсионный режимы. Расчет теплообмена в испарителях с кипением внутри труб на практике обычно ведут с помощью эмпирических соотношения. Наиболее перспективной является методика, основанная на интегрировании локальных значений теплоотдачи при использовании истинных скоростей фаз с учетом режимов течения.

Пластинчатые теплообменники в сравнении с традиционными кожухотрубными аппаратами обладают рядом существенных преимуществ: высокие коэффициенты теплопередачи, компактность, меньшая масса, существенное сокращение внутреннего объема рабочих сред, ряд эксплуатационных технологических преимуществ, простота очистки теплообменной поверхности химическим способом. Испарители с кипением хладагентов в малых каналах – одно из новейших направлений развития внутриканального кипения. Современная классификация щелевых каналов в зависимости от гидравлического диаметра D_n делятся на: традиционные каналы с $D_n > 3$ мм, миниканалы при $200 \text{ мк} < D_n < 3$ мм и микроканалы с $10 \text{ мк} < D_n < 200 \text{ мк}$. Существуют карты режимов в малых каналах и различные подходы к описанию гидродинамических процессов. Однако безусловная перспективность такого типа теплообменников требует дальнейших исследований для оценки влияния малый размер канала на парообразование.

В сообщении **Омелечко С.Е., Малышева А.А.** (Университет ИТМО) «Современные подходы к исследованию гидродинамики двухфазных потоков кипящих хладонов» показано, что коэффициенты теплоотдачи и перепады давлений при движении кипящих потоков в трубах теплообменных аппаратов при прочих равных условиях существенно зависят от режима (формы) течения. При движении двухфазного потока абсолютные скорости жидкой и паровой фаз различны, причем при течении в горизонтальных трубах скорость пара больше скорости жидкости. Поэтому для характеристики двухфазного течения наряду с величинами (расходными), рассчитанными по уравнениям материального и теплового баланса, необходимо использовать величины (истинные), определение которых ведется с учетом движения каждой из фаз в отдельности. Кроме массового расходного паросодержания все прочие параметры не имеют строгого физического смысла и являются величинами условными.

«Второй вириальный коэффициент хладагента R41 и дифторметана» – тема доклада **Клецкого А.В., Митропова В.В. и Толстого А.П.** (Университет ИТМО). Проанализированы экспериментальные и теоретические исследования термодинамических свойств R32 и R41, из которых были выделены значения второго вириального коэффициента (ВВК). Аппроксимацией имеющихся данных получены уравнения для температурной зависимости ВВК. Для R32 массив данных включал 79 значений ВВК в интервале температур от 200 до 463 К. Для хладагента R41 массив исходных данных включал 31 значение ВВК в диапазоне от 0 до 190 °С. Относительные отклонения расчетных значений второго вириального коэффициента дифторметана от наиболее надежных литературных данных не превышали 2 %.

Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Пятаков Г.Л., Баранцов А.А. (Университет ИТМО) оценили «Критериальные единицы вязкости фторуглеродов в состоянии разреженных газов». Объект исследования – гидрофторуглероды – альтернативы CFC- и HCFC-классам хладагентов. При систематизации экспериментальных данных о вязкости хладагентов в состоянии разреженного газа использована методология Л.П. Филиппова и И.Ф. Голубева. Расчеты показывают хорошее согласие с результатами опытов для значений приведенных температур в диапазоне $\tau = 0,6-1,2$. Результаты расчетов для индивидуальных хладагентов и азеотропов сопоставлены с литературными данными. На основе сочетания эмпирических методов и представлений молекулярно-кинетической теории оценена атмосферная вязкость двух азеотропов R508A и R509A.

«Молекулярно-кинетическая интерпретация и экспериментальное исследование теплопроводности HFC-хладагентов» – тема доклада **Цветкова О.Б., Лаптева Ю.А., Ефременковой А.К., Волкова Д.Г.** (Университет ИТМО). Рассмотрены озонобезопасные рабочие вещества техники низких температур HFC-класса с умеренным потенциалом глобального потепления. Экспериментально исследована теплопроводность гидрофторуглеродов HFC-134a (1,1,1,2-тетрафторэтан), HFC-32 (дифторметан) и их смеси в состоянии разреженного газа в диапазоне температур 293–368 К. Реализован стационарный метод коаксиальных цилиндров. Образцы исследованных хладагентов содержали не менее 98,5 % основного продукта. Экспериментальный стенд аттестован по образцовым веществам: толуолу, аргону и хладагенту HCFC-22. Погрешность экспериментальных данных не превышала 2,5–3,0 %.

Используя выводы молекулярно-кинетической теории, рассмотрены эффективные способы интерпретации коэффициентов переноса, основанные на классическом и квазиклассическом описании теплопроводности разреженных многоатомных газов. Трактовка кинетической теории и скейлинговых параметров межмолекулярного взаимодействия представлена моделью потенциала межмолекулярного взаимодействия Леннарда–Джонса 12:6. Возможности эмпирических обобщений для кинетических коэффициентов аргументированы методологией, предложенной в работах Филиппова, Голубева, Расторгуева. Обсуждается возможность использования представлений об аналогии процессов переноса в контексте теории Мейсона–Мончика для прогнозирования неравновесных кинетических характеристик.

Список литературы

1. *Цветков О.Б.* Холодильные агенты. – СПб: СПбГУНиПТ, 2003. – 216 с.
2. *Железный В.П., Маркварт А.С.* Новые структурно-аддитивные методы прогнозирования теплофизических свойств углеводородов. Часть 1 – прогнозирование псевдокритических параметров газовых конденсатов и их фракций // Холодильная техника и технология, 2011, № 6 (134) С. 25-31.
3. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* Холодильные агенты без границ // Вестник Международной академии холода. 2010. № 1. С. 24–27.
4. *Цветков О.Б., Цветков О.Н., Лантев Ю.А.* Свойства холодильных масел и маслофреоновых растворов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 188 с.
5. *Бараненко А.В.* Холод в глобальном мире // Холодильная техника. – 2013. – № 3. – С. 4–9.
6. *Цветков О.Б.* Хладагенты и окружающая среда// Холодильная техника. – 2013. – № 1. – С.4–7.
7. *Железный В.П., Жидков В.В.* Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. – Донецк: Изд-во Донбасс, 1996. – 144 с.
8. *Ховалыг Д.М., Бараненко А.В.* Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах // Холодильная техника. – 2013. – № 10. – С. 38–42.
9. *Клецкий А.В., Митропов В.В.* Второй вириальный коэффициент хладагента R41 // Вестник Международной академии холода. – 2014. - № 2. – С. 45-46.
10. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* Выбор хладагента и реализация метода коаксиальных цилиндров для исследования теплового движения молекул // Казахстан–холод 2014: Сб. докл. IV межд. науч.-техн. конф., Алматы, 27.01.2014. – Алматы, 2014. – С. 111–113.
11. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* О теплопроводности дифторметана (HFC–32) в состоянии разреженного газа // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С. 22–26.
12. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* Об интерпретации результатов исследований теплопроводности жидких HFC-зеотропов и HFC-азеотропов в рамках дебаевской континуальной схемы описания// Материалы XIV Росс. конф. (с междун. участием) по теплофизическим свойствам веществ, Казань, 15–17 октября 2014 г. Том I. – Казань, КНИТУ, 2014. – Т. 1. – С. 353–359.
13. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* Атмосферная вязкость азеотропных смесей Газообразных CFC-, HCFC-, HFC и FC-классов хладагентов// Холодильная техника. – 2014. – № 10 – С. 39–42.
14. *Цветков О.Б., Лантев Ю.А.* Исследование температурной зависимости теплопроводности HFC-134a в состоянии разреженного газа // Вестник Международной академии холода. 2014. № 4. С. 59–62.
15. *Цветков О.Б., Данин В.В.* Свободно–конвективное охлаждение теплонагруженных поверхностей // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2.
16. *Цветков О.Б., Бараненко А.В., Сапожников С.З., Лантев Ю.А., Ховалыг Д.М., Пятаков Г.Л.* Озонобезопасные хладагенты // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 3.
17. *Цветков О.Б.* Инновационные решения эколого-энергетических проблем индустрии холода // Микроклимат и холод (Беларусь). – 2014.
18. *Бараненко А.В., Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Ховалыг Д.М.* Миниканальные теплообменники в холодильной технике// Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 3.
19. *Железный В.П., Семенюк Ю.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н.* Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанофлюидов в свободном объеме // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 4–9.
20. *Coulomb. D.* World tendencies and priorities in development of low-temperature engineering. – Вестник Международной академии холода. – 2012. - № 4. – С.3-7.

21. Seryakov A.V. Pulsation flow in the vapor channel of short low temperature range heat pipes // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 2, №2 (april). – P. 40-49.
22. Seryakov A.V. Velocity measurements in the vapor channel of low temperature range heat pipes // *Int. J. of Engineering Research and Technology*. – 2013. – Vol. 2, № 8. – P. 1595-1603.
23. Постановление Правительства РФ от 20 ноября 2014 г. № 2327 «О регулировании обращения озоноразрушающих веществ».
24. Coulomb. D. The refrigerant's future: The phase down of HFCs and its consequences // *Вестник Международной академии холода*. 2014. № 1. С. 3-6.
25. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Бочкарев И.Н. Оптимизация свойств хладоносителей с помощью метода планирования эксперимента // *Вестник Международной академии холода*. 2007. № 4. С. 11-16.

Referenses

1. Tsvetkov O.B. *Kholodil'nye agenty*. – SPb: SPbGUNIPT, 2003. – 216 s.
2. Zheleznyi V.P., Markvart A.S. Novye strukturno-additivnye metody prognozirovaniya teplofizicheskikh svoystv uglevodorodov. Chast' 1 – prognozirovanie psevdokriticheskikh parametrov gazovykh kondensatov i ikh fraktsii // *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, № 6 (134) S. 25-31.
3. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *Kholodil'nye agenty bez granits* // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2010. – № 1. – S. 24–27.
4. Tsvetkov O.B., Tsvetkov O.N., Laptev Yu.A. *Svoistva kholodil'nykh masel i maslofreonovykh rastvorov*. – SPb.: SPbGUNIPT, 2010. – 188 s.
5. Baranenko A.V. *Kholod v global'nom mire* // *Kholodil'naya tekhnika*. – 2013. – № 3. – S. 4–9.
6. Tsvetkov O.B. *Khladagenty i okruzhayushchaya sreda* // *Kholodil'naya tekhnika*. – 2013. – № 1. – S.4–7.
7. Zheleznyi V.P., Zhidkov V.V. *Ekologo-energeticheskie aspekty vnedreniya al'ternativnykh khladagentov v kholodil'noi tekhnike*. – Donetsk: Izd-vo Donbass, 1996. – 144 s.
8. Khovalyg D.M., Baranenko A.V. *Neustoichivosti dvukhfaznogo techeniya veshchestv pri kipenii v mikrokanalakh* // *Kholodil'naya tekhnika*. – 2013. – № 10. – S. 38–42.
9. Kletskii A.V., Mitropov V.V. *Vtoroi virial'nyi koeffitsient khladagenta R41* // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2014. – № 2. – S. 45-46.
10. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *Vybor khladagenta i realizatsiya metoda koaksial'nykh tsilindrov dlya issledovaniya teplovogo dvizheniya molekul* // *Kazakhstan–kholod 2014: Sb. dokl. IV mezhd. nauch.-tekhn. konf.*, Almaty, 27.01.2014. – Almaty, 2014. – S. 111–113.
11. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *O teploprovodnosti diftormetana (HFC–32) v sostoyanii razrezhennogo gaza* // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2014. – № 3. – S. 22–26.
12. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *Ob interpretatsii rezul'tatov issledovaniya teploprovodnosti zhidkikh HFC-zeotropov i HFC-azeotropov v ramkakh debaevskoi kontinual'noi skhemy opisaniya* // *Materialy XIV Ross. konf. (s mezhdun. uchastiem) po teplofizicheskim svoystvam veshchestv*, Kazan', 15–17 oktyabrya 2014 g. Tom I. – Kazan', KNITU, 2014. – T. 1. – S. 353–359.
13. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *Atmosfernaya vyazkost' azeotropnykh smesei Gazoobraznykh CFC-, HCFC-, HFC i FC-klassov khladagentov* // *Kholodil'naya tekhnika*. – 2014. – № 10 – S. 39–42.
14. Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. *Issledovanie temperaturnoi zavisimosti teploprovodnosti HFC-134a v sostoyanii razrezhennogo gaza* // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2014. – № 4. – S. 59–62.
15. Tsvetkov O.B., Danin V.V. *Svobodno–konvektivnoe okhlazhdenie teplonagruzhennykh poverkhnostei* // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protssy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2014. № 2.
16. Tsvetkov O.B., Baranenko A.V., Sapozhnikov S.Z., Laptev Yu.A., Khovalyg D.M., Pyatakov G.L. *Ozonobezopasnye khladagenty* // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye»*

rovaniye». 2014. № 3.

17. Tsvetkov O.B. Innovatsionnye resheniya ekologo-energeticheskikh problem industrii kholoda // *Mikroklimat i kholod* (Belarus'). – 2014.

18. Baranenko A.V., Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Khovalyg D.M. Minikanal'nye teploobmenniki v kholodil'noi tekhnike // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*. 2014. № 3.

19. Zheleznyi V.P., Semenyuk Yu.V., Nikulin A.G., Luk'yanov N.N. Metodicheskie osobennosti eksperimental'nogo izucheniya protsessov kipeniya nanoflyuidov v svobodnom ob"eme // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2014. – № 3. – S. 4–9.

20. Coulomb. D. World tendencies and priorities in development of low-temperature engineering. – *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. – 2012. - № 4. – S.3-7.

21. Seryakov A.V. Pulsation flow in the vapor channel of short low temperature range teat pipes // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 2, №2 (april). – P. 40-49.

22. Seryakov A.V. Velocity measurements in the vapor channel of low temperature range heat pipes // *Int. J. of Engineering Research and Technology*. – 2013. – Vol. 2, № 8. – P. 1595-1603.

23. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20 noyabrya 2014 g. № 2327 «O regulirovanii obrashcheniya ozonorazrushayushchii veshchestv».

24. Coulomb. D. The refrigerant's future: The phase down of HFCs and its consequences // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. № 1. S. 3-6.

25. Baranenko A.V., Kirillov V.V., Bochkarev I.N. Optimizatsiya svoistv khladositelei s pomoshch'yu metoda planirovaniya eksperimenta // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2007. № 4. S. 11-16.