

Холодильные агенты — без границ*

Д-р техн. наук О. Б. ЦВЕТКОВ, канд. техн. наук Ю. А. ЛАПТЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

The current situation concerning HCFC-refrigerants, regulation and behaviour related to the ozone layer and the global warming problems are reviewed. The main challenges for use HFC-based and natural refrigerants with regard to the performance optimization of refrigeration, including the environmental aspects, research and technological development are discussed.

Key words: chlorofluorocarbons, Montreal Protocol, refrigerants, thermophysical properties.

Ключевые слова: хлорфторпроизводные углеводороды, Монреальский протокол, холодильные агенты, теплофизические свойства.

«Холодильные агенты на все времена. Евроожидания и российский опыт» — с таким названием в Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ) 2 февраля 2010 г. состоялась научно-техническая конференция с международным участием. Организаторы конференции: Международная академия холода (MAX), СПбГУНиПТ, Рабочая группа «Свойства хладагентов и теплоносителей» Научного совета РАН по проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика». Генеральные спонсоры — ООО «Технологии низких температур» и ООО «Балтэнергомаш».

В конференции участвовали: Национальный институт стандартов и технологий (NIST), г. Баулдер, США; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны Национальной академии наук Беларусь, ОАО «Оргпищепром» (Минск), Одесская государственная академия холода (ОГАХ), Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского (ДонНУЭТ), Донецкий НТУ, холдинг «Группа Норд» (все — Украина); МГТУ им. Н. Э. Баумана, МЭИ (ТУ), МГУ технологий и управления, ГНУ «ВНИХИ», ОАО «POLAIR», Научно-испытательный центр — филиал Центрального института авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, ГНЦ ФГУП «Акустический институт им. академика Н. Н. Андреева», ООО «Терминал Столица» (все — Москва); Институт проблем геотермии РАН, г. Махачкала; Петрозаводский ГУ; ОАО «Гран», г. Волжск, Республика Марий Эл; ООО «Трансхолодмаш», г. Воронеж; ООО «Техно-

логии низких температур», ОАО «Гипрорыбфлот», ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, СПбГПУ, СПбГАСУ, СПбГУНиПТ, ОАО «НИПИИ "Ленметрогипротранс"», ЗАО «СМУ-9 Метростроя» (все — Санкт-Петербург), преподаватели, научные сотрудники, аспиранты и докторанты вузов.

Приветствуя участников конференции, президент Международной академии холода (MAX), ректор СПбГУНиПТ А. В. Бараненко отметил актуальность, особенно в эти дни, проблем экологической безопасности и сохранения климата Земли. На саммите в декабре 2009 г., посвященном этим вопросам, не удалось согласовать «Копенгагенское соглашение», которое планировали принять после завершения срока действия Киотского протокола. Докладчик напомнил, что прошедший 2009 год был годом 100-летнего юбилея Национального комитета России по холодильному делу, созданного по инициативе участников 1-го Международного конгресса по холду в Париже в 1908 г. Президент MAX пожелал участникам конференции успехов и плодотворной работы.

С докладом «Холодильные агенты. Утопии и идентификация устойчивого развития» выступил Цветков О.Б. (СПбГУНиПТ). Всем памятен 1996 год, когда, следуя Монреальному протоколу, было запрещено производство хлорфторбромуглеродов (ХФУ) — хладагентов R11, R12, R113 и многих других. Последующие поправки к Монреальному протоколу производство гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) планировали прекратить с 2030 года, однако в сентябре 2007 г., когда Протоколу исполнялось 20 лет, произошла его корректировка. В итоге запрещено потребление ГХФУ с 2020 года, и коснется это хладагентов, разрушающих озоновый слой —

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00350).

R22, R141b, R21, R142b и R123. Известно, что после введения запрета на ХФУ именно гидрохлорфторуглероды стали основными для России, многих стран Европы, Азии и Америки, составляя иногда до 70 % всех веществ, используемых для получения холода, в тепловых насосах, при создании высокоеффективной тепловой изоляции.

В России в так называемые «тучные» годы XXI века, по разным оценкам, потребление ГХФУ приблизилось к 40 тыс. метрических тонн в год, что включало собственное производство плюс импорт за минусом экспорта. Оценки количества R22, уже заправленного в холодильных системах, крайне разноречивы и колеблются от 20 до 60 тыс. метрических тонн. Последняя цифра более чем значительна, но не удивительна, если учесть парадоксальную тенденцию последних десяти лет, когда аммиачные установки переводили на R22 и к тому же строили новые промышленные холодильники и склады на R22.

Новые лимиты Монреальского протокола 2007 года для России известны: с 1 января 2010 года потребление ГХФУ — не более 1000 условных тонн (одна условная тонна равна произведению метрической тонны на потенциал разрушения озонового слоя для данного хладагента), т. е. речь идет о менее 20 тыс. метрических тонн в год. Однако с 1 января 2015 года разрешенное по Протоколу потребление R22 в России станет гораздо меньше — около 400 условных тонн в год, т. е. примерно 7 тыс. метрических тонн. С 1 января 2020 года потребление ГХФУ в России практически должно прекратиться.

Нетрудно понять, что уже через пять лет запланированного количества R22 (а в коммерческих установках этому хладагенту альтернативы нет!) едва хватит на сервисное обслуживание. Расставаясь с R12, в 1996 году мы имели тыл — хладагент R22. После 2015 года резервов, похоже, не будет.

Переход с R22 на гидрофтоглероды (ГФУ), естественно, реален, но это «радостное» событие снова означает вливание российских миллиардов в экономику других стран. С ГФУ тоже не все просто, в том числе с хладагентом R134a. Снижение потребления R134a уже обсуждается, и к 2033 году планируют довести его потребление до 15 % от уровня 2004—2006 годов.

Производить ГФУ крайне затратно, а из-за планируемых на них запретов, похоже, станет и нерентабельно. Самое время сконцентрировать имеющиеся ресурсы на производстве природных хладагентов, хотя времени не осталось. И, конечно, очень бы хотелось, чтобы регламентирующие органы России прониклись судьбоносностью сложившейся ситуации и пониманием того, что цивилизованное и срочное ее решение по природным хладагентам отвечает национальным интересам России, а призывы к модернизации относятся, в том числе, и к системам надзора и регулирования.

Технологии градиентной теплометрии, основанные на реализации поперечного эффекта Зеебека в градиентных датчиках теплового потока, рассмотрены в докладе Сапожникова С. З. (СПбГПУ) «Градиентная теплометрия: техника, результаты, перспективы в холодильной технике». Созданы два семейства датчиков: из анизотропных монокристаллов висмута и на основе косослойных композитов, в которых использованы металлы, сплавы и полупроводники. ТермоЭДС, генерируемая датчиком, линейно связана с тепловым потоком в его сечении. Установлена аномально низкая постоянная времени градиентных датчиков (1—10 нс), делающая их практически безынерционным измерительным средством для большинства видов теплообмена.

Накопленный большой опыт применения градиентной теплометрии позволяет рекомендовать ее к использованию в холодильной технике, например, для контроля обмерзания приборов охлаждения, скопления масла в нижних секциях батарей и испарителей и т. д. Интересны перспективы теплометрии для контроля процессов охлаждения и замораживания пищевых продуктов, как датчиков систем управления и защиты низкотемпературных установок и др.

«Современная эффективность промышленных и маломощных аммиачных систем. Реальность их безопасной эксплуатации» — тема доклада Полевого А. А. (ООО «Технологии низких температур»). Докладчик отметил явный парадокс в современной холодильной технике России: с одной стороны, непримиримая борьба с экологически вредными веществами, с другой — радикальное запрещение аммиака. Не комментируя доказательную базу влияния фреонов на окружающую среду, ясно одно: курс на запрещение аммиака объективно ведет к увеличению доли фреоновых холодильных установок. Аммиачные холодильные системы повсеместно переводят на хладагент R22, признаваемый опасным для окружающей среды. Аммиачные холодильные установки не опасны для окружающей среды, поскольку аммиак — природный хладагент. И тем не менее, из-за жесточайших и часто просто не поддающихся логике регламентов для аммиачных холодильных систем создавать их в России просто нерентабельно, а озоноопасные, создающие парниковый эффект фреоны проталкивают в промышленность все шире и шире. Заправка промышленных холодильных установок составляет тонны и даже десятки тонн уже «обреченного» фреона R22.

Основа регламентов аммиачных установок создавалась в середине прошлого века, отдавая дань ужасающему качеству арматуры того времени, полному отсутствию автоматизации, недежным и аварийно-опасным компрессорам. В мире сегодня изменилось решительно все, кроме непоколебимых правил по разработке, а самое главное — по оформлению и эксплуатации аммиачных систем. Явный нонсенс, когда для небольшой аммиач-

ной установки стоимость проектной документации из-за крайне сложного ее оформления практически равна стоимости всего оборудования.

В докладе Миронова М. А. и Пятакова П. А. (Акустический институт) «Акустические технологии получения холода» рассмотрены проблемы, связанные с практическим использованием акустических холодильников. Разработаны действующие модели термоакустических преобразователей с различными мощностями. Акустические технологии получения холода являются экологически безопасными, так как в качестве рабочего тела используется сжатый гелий или его смеси с другими благородными газами.

Доклад «Малогабаритные конденсаторы передвижных холодильных установок с динамично-дисперсным слоем» представили Пеленко В. В., Антуфьев В. Т., Татаренко Б. А. (СПбГУНПТ). С целью обеспечения работы холодильной установки при температурах наружного воздуха до 60 °С и выше предложена конструкция конденсатора с использованием виброслоя нейтральных частиц, омывающих трубки конденсатора, за счет вибрации компрессора. Вибрация частиц в интервале частот от 25 до 50 Гц способствует повышению коэффициента теплоотдачи от стенок труб конденсатора в окружающую среду до 2,7–4,0 раз.

Эффективность теплонасосных установок, как показано в докладе Тимофеева Б. Д. и Волкова В. В. (ОИЭЯИ–Сосны, ОАО «Оргпищепром») во многом зависит от соотношения цен на электрическую и тепловую энергию. Рекомендован интервал температур так называемых бросовых тепловых потоков, в котором могут эффективно работать теплонасосные системы при существующих региональных ценах на энергоносители.

Возможность применения абсорбционной холодильной машины, использующей отходящие газы газотурбинного двигателя (ГТД) для повышения его КПД, — тема доклада Ананьева В. В., Ведешкина Г. К., Князевой А. Н., Назаренко Ю. Б. (ЦИАМ, МГУТУ) «Применение абсорбционных холодильных машин в составе турбоприводов газоперекачивающих агрегатов». В настоящее время на магистральных газопроводах в качестве приводных двигателей нагнетателей (компрессоров) газоперекачивающих станций широко используются выработавшие ресурс авиационные ГТД. Расчеты, проведенные для случая привода на базе ГТД НК–86, показывают, что при снижении температуры газа на входе в ГТД с 15 до –5 °С КПД возрастает до 37,6 %, а мощность — до 37,6 МВт. Для понижения температуры может быть применена мощная абсорбционная холодильная машина, использующая теплоту уходящих из ГТД газов, температура которых достигает 390 °С.

Доклад «Численное моделирование процесса рассольного замораживания ледогрунтового ограждения при движении подземных вод» представил коллектив ав-

торов: Маслак В. А., Малышев А. А., Марков В. А., Артюхов Д. Ю., Петрова М. С. (Ленметрогипротранс, СПбГУНПТ). Рассматривалась двумерная задача тепломассопереноса в пористой флюидонасыщенной среде с возможностью перехода флюида в твердое состояние (промерзание) с изменением проницаемости. Предположение, что флюид распространяется в пористой среде по закону Дарси, было проверено в серии численных экспериментов, моделирующих промерзание грунта. Показано, что исследуемая среда имела выраженную неоднородность проницаемости по внешней поверхности ледогрунтового ограждения. На модели было наглядно проиллюстрировано предположение специалистов по замораживанию грунтов о том, что в зоне шахтного ствола имеется интенсивное движение подземных вод. Расчеты, выполненные на модели, хорошо коррелируются с данными натурных измерений в контрольных скважинах в процессе рассольного замораживания грунтов шахтного ствола метро.

Обустройство фундаментов и оснований объектов промышленного и гражданского строительства на газоконденсатных и нефтяных месторождениях Ямала и Таймыра представил Ананьев В. В. (ООО «НПП "Медгаз"») в докладе «Комплексы термостатирования грунтов Крайнего Севера». Обсуждаются технологии изготовления сезонных охлаждающих устройств (СОУ) с глубиной охлаждения и промерзания пластично-мерзлых грунтов 10–15 м. Основными хладагентами для них являются R22 и аммиак. Определены главные направления дальнейшего развития: агрегатирование сезонно действующих устройств; переход к заправке СОУ от R22 к природным хладагентам — диоксиду углерода и аммиаку; разработка глубинных (до 100 м) охлаждающих устройств. Представлены материалы по программным продуктам на базе энталпийного метода и метода элементарных объемов для теплотехнических расчетов и прогнозирования процессов в системах атмосфера — СОУ — грунт (СПбГУНПТ, ООО «НПП "Медгаз"»).

В докладе Улитина В. В. (СПбГУНПТ) «Влияние изменения климата на состояние мерзлых грунтов» сделан акцент на процессах, происходящих в верхних (активных или деятельных) слоях грунта, лежащих на мощном слое вечной мерзлоты. Согласно прогнозу, на территории криолитозоны России к 2100 году среднегодовая температура приземного воздуха может повыситься на 4–8 °С в зависимости от географического положения района. Актуальным становится решение вопросов, связанных с увеличением производительности термостабилизаторов грунтов (ТСГ), с надежностью работы ТСГ и особенно СОУ в условиях потепления климата, с альтернативными техническими решениями в условиях интенсивной деградации верхних слоев мерзлоты. Предлагается описание процессов в мерзлых грунтах на уровне компью-

терного моделирования с помощью метода элементарных объемов.

Коллективом авторов (Осокин В. В., Железный В. П., Ржесик К. А., Селезнева Ю. А., Матвиенко В. Г., Ландик А. В., Жидков Ю. В., Соколов Г. В., Демин М. В., Брюшков Р. В., Мазур В. А., Радионенко В. Н., Данько В. П., Карнаух В. В. — ДонНУЭТ, ОГАХ, ДонНТУ, холдинг «Группа Норд», Украина) представлены доклады: «Научно-технические основы обеспечения надежности, технической и экологической безопасности малой холодильной техники, работающей на углеводородах (на примере изобутана)»; «Об опасности разрушения линии нагнетания работающей компрессорной системы, заправленной изобутаном, при наличии сквозного повреждения в линии всасывания»; «Об условиях снижения энергопотребления малой холодильной техникой при обдуве конденсатора малогабаритным вентилятором»; «Оптимальное проектирование модулей с модифицированной атмосферой»; «О методике определения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов в бытовых холодильных приборах»; «Об использовании солнечных коллекторов в системе теплоснабжения на предприятиях пищевых производств».

«Метод повышения эффективности тепловых аппаратов пищевой промышленности» рассмотрели авторы доклада Громцев С. А., Антуфьев В. Т., Амосова М. А. (СПбГУНПТ). Предложено сжигать газ в виде ионизированной смеси, воздействуя на нее постоянным электрическим полем, что позволяет снизить количество окиси углерода в дымовых газах до 28 %, а расход топлива — до 12 %.

На конференцию были представлены доклады, посвященные актуальным исследованиям теплофизических и термодинамических свойств холодильных агентов и хладоносителей. Устюжанин Е. Е., Шишаков В. В., Абдулгатов И. М., Френкель М., Рыков В. А. (МЭИ; Институт проблем геотермии, НИСТ, СПбГУНПТ) представили доклад «Скейлинговые модели для описания давления насыщения в широком интервале температур». Рассматривались модели термодинамических свойств $F = (\rho_l, \rho_g, P_s)$ на линии насыщения. Сделан анализ моделей, описывающих плотность жидкости и газа на линии насыщения, предложенных Ландау (1964), Вегнером (1985), Анисимовым и др. (1990), Рабиновичем и Шелудяком (1995), Шиманской и др. (1996), Железным и др., Абдулгатовым и др. (2007). Детально исследовалась комбинированная модель, которая состоит из масштабной F_{scale} и регулярной F_{reg} частей. Выполнено сравнение ряда упомянутых моделей, представляющих термодинамические свойства для веществ, имеющих точные экспериментальные данные: R134a, R143a, R236ea, метанол, этанол, вода, аммиак и др.

«Анализ термодинамических циклов и теплосиловых схем для геотермальных электростанций» дан в до-

кладе Устюжанина Е. Е., Янькова Г. Г., Абдулгатова И. М., Френкеля М. (МЭИ; Институт проблем геотермии, НИСТ). Рассмотрены теплосиловые схемы бинарных геотермальных электрических станций (БГеоИС), которые используют низкокипящие рабочие вещества в виде смеси (аммиак и вода), а также индивидуальные хладагенты R134a и аммиак. Опробована методика численного моделирования параметров БГеоИС. Среди параметров моделирования рассматриваются термодинамические критерии цикла, представляющие собой теплоту, работу расширения в турбине, КПД, экспергетический КПД и др. Предложена модель для оценки теплогидравлических характеристик блоков БГеоИС, входящих в теплосиловую схему.

Среди докладов, представленных СПбГУНПТ: «Использование асимметричных единых уравнений состояния холодильных агентов» (Кудрявцева И. В., Рыков В. А.); «Выбор сглаживающих функций при построении уравнений состояния, описывающих критическую точку» (Рыков С. В.); «Уравнение линии фазового равновесия аммиака» (Кудрявцева И. В., Рыков А. В.). Показано, как асимметричное единое уравнение состояния, разработанное на основе метода псевдокритических точек, использовано для расчета равновесных свойств технически важных хладагентов R134a, R218, R23, R717.

В сообщении Кириллова В. В., Сивачева А. Е. «Пути повышения энергетической эффективности работы системы хладоснабжения с промежуточным хладоносителем» рассмотрена методология выбора хладоносителей с прогнозируемыми свойствами, основанная на учете физико-химических взаимодействий между компонентами раствора. Отмечено, что созданные водно-пропиленгликоловые электролитные хладоносители по теплофизическому и технико-эксплуатационным свойствам превосходят широко используемые водно-пропиленгликоловые и водосолевые хладоносители.

Сообщение Клецкого А. А. посвящено второму вариальному коэффициенту озонобезопасного хладагента R23, а доклад Цветкова О. Б., Лаптева Ю. А. — теплопроводности ряда HFC-хладагентов на линии фазового равновесия.

По итогам работы в 2009 году и планам на 2010 год Рабочей группы «Свойства хладагентов и теплоносителей» Научного совета РАН и секции МАХ «Теоретические основы холодильной и криогенной техники» выступил ее председатель О. Б. Цветков.

Участники конференции подтвердили актуальность ежегодных встреч на улице Ломоносова, 9, в Санкт-Петербурге, особо памятя о предстоящем в декабре 2010 года саммите, который будет посвящен Киотскому протоколу.