

ПОСТ-РЕЛИЗ

Научно-технической конференции с международным участием «Техника низких температур в условиях новой парадигмы энергетического перехода»

1–2 февраля 2022 г. в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете ИТМО (Университет ИТМО) на мегафакультете «Биотехнологии и низкотемпературные системы» состоялась научно-техническая конференция с международным участием «Техника низких температур в условиях новой парадигмы энергетического перехода». Организаторы конференции: Международная академия холода (МАХ), Университет ИТМО, Рабочая группа «Свойства хладагентов и теплоносителей» Национального комитета по теплофизическим свойствам веществ РАН. Информационную поддержку осуществляли журналы «Вестник Международной академии холода», «Империя холода», интернет-портал «Holodinfo.ru». Генеральными спонсорами конференции выступили ООО «ТехноФрост» и ООО «КриоФрост Инжиниринг».

В конференции участвовали: Алматинский технологический университет (АлТУ), Республика Казахстан; Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий (БГУТ), Могилев; Одесская национальная академия пищевых технологий (ОНАПТ), Республика Украина; Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИХИ) — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН (Москва); Московский государственный университет пищевых производств (МГУПП); Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (РЭУ), Москва; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ), Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, Новосибирск; Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург; Новосибирский государственный технический университет (НГТУ); Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ); Россошанский колледж мясной и молочной промышленности (РКММП), Россошь Воронежской обл.; ООО «Рудетранссервис», Великий Новгород; ООО «Пионер», Красноярск; ООО «ТМИМ», Нижнекамск, Республика Татарстан; ООО «Тепловые насосы», Красноярск; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ), Колледж бизнеса и технологий; ООО «Карел Рус», ООО «ТехноФрост», ООО «ОК», ООО «ТурбоРеф Инжиниринг»; ООО «Энергия холода», ООО «КриоФрост Инжиниринг», Межрегиональная общественная организация «Северо-Запад», Ленинградское региональное отделение Всероссийского общественного движения «Волонтеры Победы», преподаватели, научные сотрудники, аспиранты, магистранты и бакалавры старших курсов Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

С приветственным словом выступили директор мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Университета ИТМО профессор Баранов И. В. и президент Международной академии холода, академик Бараненко А. В. Подчеркнута важность и актуальность обсуждаемых на конференции энергетических и экологических проблем, связанных с техникой низких температур, играющей стратегическую роль в мировой экономике. Выступающие пожелали участникам конференции плодотворной работы, профессиональных успехов, здоровья и благополучия.

Открыл конференцию доклад Цветкова О. Б., Митропова В. В., Лаптева Ю. А. (Университет ИТМО) «**Актуальные приоритеты нового энергетического перехода**». В ноябре 2021 г. конференция ООН по изменению климата COP 26 (Глазго, Великобритания) приняла «Климатический пакет», согласно которому Россия к 2060 г. должна достичь углеродной нейтральности. США планируют достичь углеродной нейтральности в 2050 г. Это решение имеет серьезное значение, как для будущего российского энергетического сектора, так и для перспектив энергетического стратегического развития мировой экономики. Отмечается, что достижение указанной цели предполагает последовательное продвижение в решении основных задач:

- изменение структуры первичного энергопотребления;
- внедрение возобновляемых источников энергии, вытеснение ископаемых видов топлива;
- создание водородной энергетики и систем хранения энергии;
- цифровая экономика;
- электрификация и трансформация транспортно-го сектора индустрии;
- удешевление производства и снижение энергоёмкости.

Рассматриваются ключевые приоритеты 4-го энергетического перехода: повышение энергетической безопасности и энергосбережения, развитие атомной энергетики, сокращение спроса на нефть и газовое топливо (прежде всего в странах ЕС), прекращение строительства новых теплоэлектростанций, повышение роли возобновляемых и нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Мировую экономику могут ожидать последствия сжатия нефтяного рынка, снижения экспорта энергоресурсов, широкой технологической и межтопливной конкуренции, снижения доли энергетического сектора в топливно-энергетическом комплексе мировой экономики за счет вытеснения неэнергетическими источниками инновационного экономического роста и активного развития неуглеродной энергетики в мире. В докладе сфор-

мулированы практические цели и задачи нового энергоперехода, даны оценки прогноза ожидаемых результатов, показана тесная связь между геополитикой и энергетикой, возможные несоответствия между восприятием мировой экономики и ее реальностью.

Доклад «**CAREL HEOSone: энергоэффективное решение для низкотемпературного ТХО с R290**» представлен Бруком А. П., Лукашкиным С. (ООО «Карел Рус»). Реалии последних лет, связанные с введением квот на импорт большинства перспективных хладагентов на территорию России, привели к пересмотру выбора рабочего вещества для торгового холодильного оборудования со встроенным холодильным контуром и, в частности, переходу на пропан (R290).

Хладагент R290 имеет неоспоримые преимущества: отличные термодинамические свойства, низкая стоимость, низкие экологические факторы (GWP=3, ODP=0), отсутствие температурного глайда. Хладагент идеально подходит для многоконтурных холодильных систем с заправкой до 150 г, перспективен при увеличении лимита заправки до 500 г. К минусам пропана относится высокий класс пожароопасности — А3. Следует отметить, что доля использования R290 на рынке холодильного оборудования при его встраивании всегда была высока.

Компания «CAREL» предлагает увеличить энергоэффективность работы системы на пропане за счет использования новых компонентов холодильного контура, улучшающих показатели энергопотребления как отдельного узла, так и системы в целом: BLDC-компрессор с драйвером управления электродвигателем DC вместо On/Off-компрессоров; электронный расширительный вентиль в качестве замены капиллярной трубки; EC-вентиляторы как альтернатива On/Off-вентиляторам испарителя и конденсатора. Использование для управления новыми компонентами смарт-алгоритмов приводит к снижению энергопотребления изделий минимум на 20%, что позволяет повысить класс энергоэффективности до значения «В» в соответствии с новыми правилами маркировки изделий в ЕС (Ecodesign Directive). Главным итогом такого решения является стабильная температура внутри охлаждаемого объема: в установившемся режиме работы установки точность поддержания температуры составляет десятые доли градуса, обеспечивая высокие потребительские качества хранимых товаров.

«**Тонкопленочные парогенераторы бинарных геотермальных электростанций**» — тема доклада Гогина И. И. (ИТФ им. С. С. Кутателадзе). Использование тонкопленочных парогенераторов позволит существенно снизить количество дорогостоящего холодильного агента в контуре геотермальной электростанции. При спутном потоке пара и жидкости исключается попадание крупных капель на поверхность труб пароперегревателя. Применение оребренных труб в пучке с оптимальными параметрами оребрения обеспечивает равномерное орошение. Искусственные центры парообразования оребренной трубы многократно интенсифицируют теплообмен при кипении пленки, что в конечном итоге приводит к снижению веса и габаритов парогенератора.

«**Новые индикаторы для оценки углеродного следа при создании и эксплуатации холодильного оборудования**» обозначены в докладе Корниевича С. Г., Же-

лезного В. П., Хлиевой О. Я., Валбаха Е. (ОНАПТ). Рассматривается новая концепция эколого-термоэкономического анализа эффективности использования энергетических ресурсов холодильного оборудования, основополагающим принципом которой является полномасштабный учет прямой и косвенной эмиссии парниковых газов при эксплуатации холодильной техники. Рассмотрена структура полной эквивалентной эмиссии парниковых газов (углеродный след) при создании и эксплуатации холодильного оборудования и низкотемпературных технологий. Сформулированы новые эколого-энергетические индикаторы, которые в полной мере отражают антропогенное влияние холодильных технологий на окружающую среду. Предложенная модель рекомендуется для проведения эколого-энергетического аудита и менеджмента при создании, эксплуатации и утилизации холодильной техники и реализации холодильных технологий.

Доклад Талызина М. С. (МГТУ) посвящен «**Моделированию работы установки охлаждения жидкостного молочного комбината энтропийно-статистическим методом анализа**». Представлены исходные данные и описаны задачи исследования установки охлаждения жидкости молочного комбината. Задачи исследования: разработка системы моделирования работы холодильной установки для охлаждения жидкости, работающей по циклу с экономайзером, и применение разработанной системы для анализа и оптимизации работы существующей холодильной установки. При разработке системы моделирования планируется применение энтропийно-статистического метода анализа и методов работы с большими объемами данных (Big Data).

В результате моделирования планируется получить зависимость потребляемой энергии, необходимой для компенсации производства энтропии по элементам установки от времени, произвести анализ полученных данных, выдать рекомендации по изменению параметров регулирования установки для охлаждения жидкости.

«**Исследование работы компрессионного бытового холодильного агрегата**» провели Бабакин С. Б., Белозеров Г. А. (ВНИХИ), Бабакин Б. С. (МГУПП), Сучков А. Н. (ВНИХИ). В настоящее время активно развивается индустрия бытовых холодильников, являющихся заключительным звеном хранения продуктов в холодильной цепи. Согласно ряду данных наибольшие потери продовольствия, называемые пищевыми отходами, происходят в конце пищевой холодильной цепи. Одновременно они являются одним из источников выбросов диоксида углерода. Углеродный след произведенных и не употребленных в пищу продуктов питания оценивается в 3,3 Гт эквивалента CO₂. В мире эксплуатируется около 2 млрд бытовых холодильников, энергопотребление которых составляет 4% от общего мирового потребления электроэнергии. Холодильник среднего объема потребляет около 13,7% электроэнергии в жилом комплексе. Одним из направлений совершенствования бытовой холодильной техники в мире является повышение требований к ее энергоэффективности. В частности, непрерывное совершенствование европейских моделей домашних холодильников привело, согласно директиве 2003/166/ЕС, к введению дополнительно 2 классов энер-

гопотребления — A^+ и A^{++} . Аналогичные требования введены в азиатских странах, например, в Китае введен национальный стандарт GB12021.2–2015. В Европе за счет снижения энергопотребления бытовой холодильной техники к 2030 г. прогнозируется сэкономить до 10^4 ГВт·ч электроэнергии.

В этом направлении проводится ряд работ, одним из которых является исследование наружного естественного и вынужденного теплообмена при охлаждении составных элементов компрессионного бытового холодильного агрегата. Разработан стенд для исследования теплообмена и других параметров работы холодильного агрегата. Приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований теплообмена конденсатора и составных элементов холодильной системы, а также других рабочих параметров. Полученные результаты будут использованы при совершенствовании конструктивных параметров холодильной системы.

Тема доклада Белозерова Г. А., Петрова В. В., Бабакина С. Б. (ВНИХИ), Бабакина Б. С. (МГУПП) — «Исследование теплообмена в вертикальной холодильной витрине». В Российской Федерации регулирование вопросов обеспечения безопасности скоропортящейся пищевой продукции осуществляется посредством технических регламентов Таможенного и Евразийского экономического союзов, а также отдельных положений Федерального закона № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов». Температурные условия хранения пищевых продуктов назначаются производителями продукции с учетом требований техрегламентов, которые на практике не всегда соотносятся с техническими возможностями холодильного и холодильно-технологического оборудования, особенно используемого на предприятиях торговли. Например, на отдельные виды скоропортящейся продукции: охлажденная продукция должна храниться в диапазоне температур от $-1,5$ до 4 °С (мясо); от $-1,5$ до 5 °С (рыба); $(2-6)$ °С (молочная продукция); замороженная продукция — при температуре не выше минус 18 °С; подмороженная рыба от -3 до -5 °С. В тоже время в соответствии с ГОСТ 23833–95, определяющем технические характеристики оборудования и методы испытаний, допускается в низкотемпературном оборудовании повышение температуры в самой теплой точке до минус 15 °С, а в период оттаивания снеговой шубы дополнительное повышение на 3 К.

Во ВНИХИ, совместно с МГУПП, выполнены исследования температурных полей в среднетемпературных вертикальных витринах с воздушной завесой, при этом одна из них была с остекленными створками. Измерялось температурное поле по площади полок, как воздуха, так и имитаторов продуктов. Установлено, что максимальный перепад температур по полезному объему для открытой витрины составляет 6 К, что отвечает требованиям ГОСТ 23833–95, но не обеспечиваются требования техрегламентов на мясную и рыбную продукцию, которые требуют, чтобы разница между наименьшей и наибольшей температурами не превышала $4,5$ К. Витрина с остекленными створками обеспечивает требования и ГОСТ и техрегламентов по хранению охлажденных продуктов, но не подходит для хранения подмороженных

продуктов. Полученные результаты будут использованы при совершенствовании холодильных цепей для скоропортящихся пищевых продуктов.

«Выбор хладагентов для холодильных систем фрукто- и овощехранилищ» сделан в докладе Цоя А. П., Грановского А. С., Воробьевой О. Д. (АлТУ). Рассмотрена возможность замены хладагентов R404A и R507 в холодильных машинах фрукто- и овощехранилищ на экологически-безопасные альтернативные рабочие вещества. Проведен расчет холодильного коэффициента циклов одноступенчатых холодильных машин с непосредственной подачей хладагента в воздухоохладители. Установлено, что при условии сохранения уровня энергоэффективности в качестве заменителей могут использоваться хладагенты R407A, R407C, R407F. В долгосрочной перспективе после 2036 года предпочтительными могут оказаться R290, R455A, R450A, R513A. Однако следует учесть, что применение хладагентов R455A, R450A, R513A может привести к увеличению капитальных затрат на создание холодильных машин.

«Перспективы применения абсорбционного термотрансформатора с двухступенчатой абсорбцией в системах теплоснабжения» оценены в докладе Мухина Д. Г. (НГТУ) и Степанова К. И. (Институт теплофизики СО РАН). Абсорбционные бромистолитиевые термотрансформаторы (АБТТ) получили широкое распространение в мире в качестве холодильных машин и тепловых насосов, которые позволяют снижать потребление первичного топлива и тепловое загрязнение окружающей среды.

В промышленных АБТТ стандартной конструкции имеется внутреннее функциональное ограничение, связанное со свойствами рабочего тела: раствор LiBr имеет ограниченную растворимость. Чтобы обеспечить в АБТТ процесс абсорбции, перепад температур между охлаждающей (нагреваемой) и охлажденной жидкостью не должен превышать 25 °С. При превышении данной величины интенсивность абсорбции в АБТТ снижается и, как следствие, снижается эффективности работы АБТТ в целом. Если перепад превышает 30 °С происходит прекращение процесса абсорбции в АБТТ. В связи с этим АБТТ стандартной конструкции имеет ограниченные температурные границы применимости, как в качестве холодильной машины, так и в качестве теплового насоса.

Использование АБТТ с двухступенчатой абсорбцией позволяет расширить температурные границы использования. В этом случае рабочий перепад температур между охлаждающей (нагреваемой) и охлажденной жидкостью можно увеличить до $45-50$ °С. Для круглогодичного использования АБТТ с двухступенчатой абсорбцией может быть предложена схема теплоснабжения на базе газовой котельной. В отопительный период АБТТ используется в качестве теплового насоса, который производит утилизацию теплоты сбросных дымовых газов котельной с одновременным нагревом обратной сетевой воды отопления. В летний период АБТТ используется в качестве холодильной машины для системы кондиционирования воздуха. Главным преимуществом при этом является то, что в качестве охлаждающей среды холодильной машины используется жидкость, охлаждаемая в сухой градирне.

Энергетическая эффективность АБТТ оценивается по количественным показателям: для холодильной машины (АБХМ) — это тепловой коэффициент, а для теплового насоса (АБТН) — коэффициент трансформации. Предварительные расчеты показывают, что в АБХМ с двухступенчатой абсорбцией тепловой коэффициент достигает значения 0,65. Коэффициент трансформации для АБТН — порядка 1,72.

«Системы хранения энергии на основе криогенных технологий сжижения воздуха» представлены в докладе Визгалова С. В., Шарапова И. И., Хисамеева И. Г. (КНИТУ). Современная тенденция к увеличению доли «зеленых», возобновляемых альтернативных источников энергии требует параллельного развития и повышения емкости систем аккумулирования энергии для сглаживания неравномерностей между ее выработкой и потреблением. В настоящее время используются несколько технологий накопления энергии с длительным периодом разряда в масштабе энергосети. Относительно новым и развивающимся решением долговременного хранения энергии большой емкости является технология, так называемого, криогенного хранения энергии в виде энергии сжиженного воздуха. В случае избытка выработки энергии она затрачивается на сжижение доступного атмосферного воздуха, его накопления в изотермических резервуарах с последующей регазификацией и расширением в турбогенераторе с отдачей энергии в общую сеть. Данные системы лучше подходят для использования в масштабе распределенной энергосистемы, чем гидроаккумуляторы или аккумуляторы сжатого воздуха, потому что это экологичные, свободно размещаемые системы, причем в непосредственной близости от потребителя. Несмотря на использование в целом известных технологий сжижения газов и выпускаемого стандартного оборудования, в данных системах нашли применение принципы рекуперации теплоты, повышающие эффективность системы.

Рассмотрено применение цикла среднего давления с турбодетандером на части прямого потока (цикл Клода) и концевым парожидкостным турбодетандером, дополненным охлаждающим потоком после турбины генератора. На основе метода энергетических балансов составлена расчетная схема цикла, позволяющая определить детандерный поток, коэффициент ожигения, удельные затраты энергии на 1 кг жидкости с учетом и без учета использования холодопроизводительности расширившегося воздуха в турбине турбогенераторной установки. Ставится две задачи расчета — определить влияние давления на прямом потоке после компрессора и температуры в точке детандерного отбора на перечисленные параметры, а также определить насколько влияет использование холодопроизводительности потока после турбины генератора.

Тушев К. А. (ООО «ОК») выступил с докладом **«Аммиачный тепловой насос. От технико-экономического обоснования до эксплуатации»**. Как правило, на молочных комбинатах потребляется значительное количество теплоты и холода, это связано как с технологическим процессом, так и в целях санитарной обработки технологического оборудования. Только на подогрев воды для санитарных нужд тратится в среднем 35 МВт·ч теплоты

ежесуточно. Вода нагревается горячим паром от центральных городских сетей, конденсат сливается в канализацию. И то, и другое значительно увеличивает финансовые затраты. При этом от холодильной установки в окружающую среду посредством испарительных конденсаторов постоянно выбрасывается 50–100 МВт·ч теплоты ежесуточно в зависимости от загрузки компрессоров.

Для снижения расходов на нагрев воды установлен агрегатированный тепловой насос, подключенный к существующей аммиачной холодильной установке. Тепловой насос (термотрансформатор) позволяет нагревать воду до 65 °С с производительностью около 800 кВт, т. е. за сутки может производить до 20 МВт·ч, при этом дополнительные затраты на электроэнергию составляют всего 140 кВт, включая насосное оборудование. Таким образом, коэффициент термотрансформации составляет около 6. При работе теплового насоса снижается тепловая нагрузка на испарительные конденсаторы, что приводит к снижению давления конденсации и снижению электропотребления компрессоров. Теоретическая окупаемость данного проекта составляет около 3,5 лет исходя из уже произведенных капитальных затрат и планируемой среднегодовой загрузки теплового насоса 90%.

Тепловой насос был подключен к нагнетательному трубопроводу аммиачной холодильной установки, из которого отбирается горячий газ и после его конденсации возвращается в холодильную систему на сторону низкого давления. Аммиачные контуры основной аммиачной холодильной системы и теплового насоса не смешиваются.

Тепловой насос представляет собой автономный поршневой компрессорный агрегат с двумя кожухопластинчатыми теплообменниками на стороне всасывания и нагнетания. В одном из них происходит передача теплоты от холодильной системы к теплому насосу, во втором — от теплового насоса к нагреваемой воде. Заправка аммиака в тепловом насосе составляет 44 кг. Для сглаживания пульсаций потребления в контуре горячей воды установлен буферный бак объемом 15 м³. К нему подключены две группы насосов: для внутреннего контуров воды через тепловой насос и для внешнего контура через промежуточные теплообменники, находящиеся на расстоянии около 200 м. Промежуточные теплообменники предусмотрены в целях безопасности персонала как дополнительный барьер между водопроводной водой и водой, циркулирующей через аммиачный тепловой насос. Холодная вода из водопровода нагревается с 10 до 55 °С перед окончательным нагревом горячим паром.

По результатам первого периода эксплуатации определено, что в зимний период при сниженных производительностях холодильной системы (менее 20%) не хватает горячего газа для работы теплового насоса на 100%, а также что чрезмерное падение давления конденсации холодильной системы снижает производительность и эффективность теплового насоса. При проектировании аналогичных систем с тепловыми насосами необходимо заранее выяснить минимально возможную холодопроизводительность установки и средствами автоматического управления поддерживать рабочие параметры теплового насоса на расчетном уровне.

Каверин А. М., Байдаков В. Г., Панков А. С., Грибакова Т. В. (Институт теплофизики УрО РАН) определили «Достижимый перегрев жидких метана и этана, насыщенных гелием». Методом измерения времени жизни определены температуры достижимого перегрева растворов метан — гелий и этан — гелий. Жидкость объемом $V=88 \text{ мм}^3$ перегревалась в стеклянных капиллярах. Исследуемый раствор готовился конденсацией газовой смеси в измерительную ячейку. Концентрация гелия в растворе определялась составом конденсируемой смеси и контролировалась по давлению насыщенных паров в процессе измерений. Заход в метастабильную область осуществлялся резким понижением давления. В опыте измерялось время от момента понижения давления до вскипания жидкости (время жизни). При заданных температуре и давлении проводилось до 50 измерений времени жизни и рассчитывалось его среднее значение τ . Частота зародышеобразования определялась как $J=(V\tau)^{-1}$.

Опыты проведены при давлениях 1,0; 1,6 и 2,0 МПа и двух концентрациях гелия для каждого раствора. Исследовательский интервал частот зародышеобразования в растворе метан-гелий составлял $J=2,4 \cdot 10^4 - 1,6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, в растворе этан-гелий — $9,0 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$. На температурных зависимостях τ выделены участки, где наблюдается резкая зависимость среднего времени жизни растворов от температуры. Здесь реализуется гомогенный механизм образования паровых зародышей. Растворение 0,1 моль% гелия приводит к понижению температуры достижимого перегрева T_n ($J=10^7 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$) раствора метан-гелий на 1,0–1,3 К. Добавка 0,05 моль% гелия к этану понижает значение T_n на 0,8–1,1 К.

Экспериментальные данные сопоставлены с расчетами по классической теории зародышеобразования в макроскопическом приближении. Полученные в опыте значения температур достижимого перегрева растворов ниже теоретических на 0,3–1,1 К. Расхождение объясняется неучетом в теории зависимости поверхностного натяжения парового зародыша от его размера.

Исследование раствора метан-гелий выполнено по гранту РФ (проект № 18-19-00276-П).

В докладе «**Экспериментальное исследование теплоемкости композиционных термоаккумулирующих материалов (ТАМ) на основе парафина**» (авторы Глек Я. О., Ивченко Д. А., Хлиева О. Я., Железный В. П., Лапардин Н. И. (ОНАПТ)) рассмотрена проблема повышения энергетической эффективности применяемых в солнечной энергетике термоаккумуляторов с органическими термоаккумулирующими материалами. С целью повышения показателей эколого-энергетической эффективности термоаккумуляторов предлагается использовать композиционные термоаккумулирующие материалы, в состав которых входят металлическая вата, фуллерены и терморасширенный графит (ТРГ). Конкретной задачей исследования являлось изучение влияния этих компонентов на эффективную теплоемкость и теплоту фазового перехода ТАМ. Показано, что использование композиционных материалов способствует увеличению теплопроводности, уменьшению величины изменения объема ТАМ при фазовом переходе, а использование композиционного ТАМ па-

рафин/ТРГ приводит к существенному увеличению теплоты плавления.

«**Межфазное натяжение и линия равновесия растворов гептан-перфторгексан и октан-перфтороктан**» — тема доклада Панасенко А. С., Байдакова В. Г. (Институт теплофизики УрО РАН). Широкое использование расслаивающихся растворов в химической промышленности и медицине является актуальным исследованием свойств границы раздела двух фаз. Типичным представителем систем для изучения поверхностных свойств являются растворы алкан-перфторалкан.

Дифференциальным методом капиллярного поднятия измерена капиллярная постоянная расслаивающихся растворов октан-перфтороктан и гептан-перфторгексан. Установка состоит из ячейки с помещенными в нее тремя капиллярами различного диаметра и системы перемешивания пробы. Ячейка помещена в ванну термостата с дополнительной системой охлаждения. Температура ячейки измерялась платиновым термометром сопротивления с неопределенностью 0,02 К. Плотности сосуществующих фаз определены вибрационным плотномером с неопределенностью 0,1 кг/м³.

Чистота исследуемых компонентов систем составляет 99%. Измерения межфазного натяжения проведены в интервале температур 293–363 К при атмосферном давлении. Установлено, что с ростом температуры межфазное натяжение убывает.

Температура расслоения определена оптическим методом, ее концентрационная зависимость аппроксимирована полиномиальной функцией. Для раствора гептан-перфторгексан критическая температура расслоения составляет $T_c=316,2 \text{ К}$, критическая концентрация $x_c=0,4$ объемн. доли. Для раствора октан-перфтороктан $T_c=348,1 \text{ К}$, $x_c=0,42$ объемн. доли.

«**Физико-химические свойства этаноламинов и их водных растворов при очистке природных газов**» исследованы в докладе Ермолаева В. А. (РУЭ им. Г. В. Плеханова). Алканоламины (аминоспирты) принято рассматривать в качестве производных аммиака, в котором один или несколько атомов водорода замещены на спиртовой радикал или спиртовой и углеводородный. По степени замещения центрального атома азота алкильными радикалами различают амины первичные, вторичные и третичные. Амины содержат минимум одну гидроксильную группу (–ОН) и одну аминогруппу (=N–).

Снизить давление насыщенных паров и повысить растворимость амина в воде помогает наличие гидроксильной группы. Щелочность, позволяющую водным растворам взаимодействовать с H_2S и CO_2 , им придает аминогруппа, благодаря которой они диссоциируют с образованием слабых кислот. Концентрация алканоламинов в воде может составлять от 10 до 60%.

Основное влияние на процесс аминовой очистки природных газов от кислых компонентов оказывают давление, температура, кратность циркуляции (расход) раствора абсорбента и концентрация этаноламина в растворе абсорбента. Кратность циркуляции абсорбента подбирают оптимальной, чтобы избыток не приводил к заметному увеличению степени очистки газа, что резко повышает эксплуатационные затраты, и к снижению степени очистки.

Основные проблемы аминовых установок очистки природного газа — вспенивание растворов и потери амина. Этот процесс может стать причиной нарушения режима работы установок, ухудшения качества очищенного газа. Потери аминов наблюдаются в результате его уноса с газом и образовании нерегенерируемых веществ.

Для грубой очистки больших объемов природного газа от CO_2 , когда степень очистки находится в пределах 0,04–0,05 %, часто применяют одноступенчатую промывку раствором моноэтаноламина. Тонкую очистку можно произвести раствором щелочи, либо двухступенчатую очистку раствором этаноламина, тогда содержание CO_2 в газе может быть в пределах 0,020–0,015 %. При этом необходима так же щелочная очистка для гарантии от проскока диоксида углерода.

Железный В. П., Ивченко Д. А., Ханчич Е. Ю., Глек Я. О. (ОНАПТ) рассмотрели **«Флуктуационную модель прогнозирования теплофизических свойств нанофлюидов на линии кипения: изобарной теплоемкости, вязкости, теплопроводности»**. В докладе приводится критический анализ существующих методов расчета теплофизических свойств (ТФС) нанофлюидов на линии кипения. Акцентировано внимание на общих принципиальных недостатках существующих методов расчета свойств. Показано, что предложенные методы расчета не в состоянии учитывать все многообразие факторов, которые определяют значения плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности данного класса жидкостей.

Для решения проблемы моделирования свойств нанофлюидов предложено использовать характерные особенности изменения температурных зависимостей таких фундаментальных свойств нанофлюидов как флуктуации термодинамических величин и энергию активации вязкого течения. Приводится детальный анализ температурных зависимостей флуктуаций плотности, мольного объема, теплоемкости, а также энергии активации вязкостного течения для различных классов веществ.

На примере анализа температурной зависимости изотермической сжимаемости, флуктуаций плотности, объема и изобарной теплоемкости показаны возможности развития флуктуационной модели прогнозирования вязкости и теплопроводности нанофлюидов на линии кипения. Рассмотрена возможность создания единой флуктуационной модели прогнозирования теплофизических свойств нанофлюидов.

«Перспективные рабочие тела для органического цикла Ренкина» рассмотрены в докладе Щемелёва А. П. (БГУТ). В последние годы все большее внимание уделяется сокращению потребления первичных энергоресурсов. Паросиловые установки, реализующие органический цикл Ренкина (ОЦР), позволяют использовать низкопотенциальные тепловые вторичные и возобновляемые энергоресурсы. В качестве рабочих тел ОЦР рассмотрены углеводороды, в том числе ароматические, эфиры, частично или полностью замещенные фторуглеводороды, спирты, силоксаны и др. Важными факторами для выбора перспективных рабочих тел являются озоноразрушающий потенциал (ODP) и потен-

циал глобального потепления (GWP), а также токсичность и воспламеняемость. Большинство веществ, которые рассматривали ранее в качестве рабочих тел ОЦР, обладают значительными значениями ODP и GWP, горючи или токсичны.

Выполнен литературный обзор теплофизических и физико-химических свойств веществ, которые могут рассматриваться в качестве возможных однокомпонентных рабочих тел для реализации в ОЦР. Установлено, что вещества компании «3М» с торговой маркой «Novac» (649, 7000, 7100, 7200, 7300, 7500 и 7600) не воспламеняемы, не токсичны, обладают нулевым озоноразрушающим потенциалом и низким потенциалом глобального потепления, достаточно инертны и не вызывают коррозии большинства конструкционных материалов. По значениям температур нормального кипения, критических температур, теплоты парообразования при атмосферном давлении и молекулярных масс эти вещества могут рассматриваться в качестве перспективных рабочих тел для реализации ОЦР.

Свойства вышеупомянутых веществ недостаточно изучены в широких диапазонах температур и давлений, характерных для ОЦР. Окончательные выводы об эффективности использования этих веществ в качестве рабочих тел ОЦР могут быть сделаны после дополнительных исследований их теплофизических свойств.

Доклад Серякова А. В., Алексеева А. П. (ООО «Рудетранссервис») посвящен **«Оценке теплоемкости испарителя линейных тепловых труб»**. Представлены результаты исследований путем решения обратной задачи теплопроводности теплофизических характеристик (теплоемкости) испарителя коротких линейных тепловых труб (ТТ) с паровым каналом, подобным соплу Лаваля, и предназначенных для охлаждения космической техники со строгим регулированием взлетной массы.

Математическая постановка коэффициентной обратной задачи теплопроводности в одномерной системе координат дополняется результатами измерений температуры поверхности ТТ вдоль образующей во всем диапазоне температурных нагрузок, теплового сопротивления, тепловой мощности испарителя и передаваемой в вихревой проточный калориметр тепловой мощностью конденсации при монотонном и близком к линейному во времени нагреве испарителя. При большом температурном напоре и начале кипения жидкого рабочего тела измеряемая температура внешней поверхности капиллярно-пористого испарителя близка к постоянной, и проводя решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности с экспериментальными значениями температуры испарителя, оказывается возможным получить численную оценку экстремальной теплоемкости работающего испарителя ТТ и удельную теплоту испарения кипящего рабочего тела и сравнить ее с табличными значениями.

Галкин Д. А. (Институт теплофизики УрО РАН) провел **«Исследование теплопроводности раствора гексен-1 — октафторбутандигидро в широком диапазоне концентраций»**. Фторорганические жидкости благодаря своим термодинамическим свойствам и химической инертности применяют в качестве теплоносителей, диэлектриков и озонобезопасных хладагентов. Одним

из перспективных направлений использования фторорганических жидкостей является применение их в технологии получения противотурбулентных присадок (ПТП). При транспортировании углеводородной жидкости в пристенной области на границе подвижной и неподвижной зон возникают пульсации давления высокой интенсивности, создающие дополнительное сопротивление.

Одним из способов борьбы с данным явлением является использование ПТП, в состав которых входит раствор гексен-1 — октафторбутандигидро. Учет теплопередачи является важным при перекачке нефти с ПТП. Основой решения проблемы служит знание теплофизических свойств вещества в условиях значительного и быстрого изменения температуры. Эти данные могут быть получены преимущественно опытным путем. В качестве первого шага, проведены измерения коэффициента теплопроводности.

Для получения опытных результатов с минимальным использованием математических расчетов необходимо выполнение основного требования к модели пересчета первичных данных опыта в искомые значения теплопроводности. Оно состоит в поддержании постоянства теплового потока от источника тепловыделения в исследуемую среду. Это требование эквивалентно поддержанию постоянства мощности тепловыделения источника.

Представлены результаты измерения коэффициента теплопроводности раствора гексен-1 — октафторбутандигидро методом нестационарного нагрева проводочного зонда в режиме постоянной мощности. Область изменения содержания долей гексен-1 составляла от 0 до 1 при температуре 23 °С.

«Влияние гелия, водорода и азота на капиллярную постоянную и поверхностное натяжение метана» оценили Андбаева В. Н. и Хотиенкова М. Н. (Институт теплофизики Ур РАН). Методом капиллярного поднятия измерена капиллярная постоянная и определено поверхностное натяжение растворов метан — азот, метан — водород и метан — гелий. Эксперименты проводились по изотермам в интервале температур 95–176 К от давления насыщения чистого метана до 4 МПа. Система метан — азот относится к типу жидкость-жидкость, две другие системы представляют собой газонасыщенные растворы.

Растворимость азота в метане при температурах ниже критической температуры азота ($T=126,2$ К) составляет 100 мол.%, максимальная растворимость гелия и водорода меньше этого значения в 100 и 25 раз соответственно. При $T=95$ К добавление 0,15 мол.% азота в метан уменьшает его поверхностное натяжение на 2,68 мН/м, добавление такого же количества водорода и гелия уменьшает поверхностное натяжение метана соответственно на 0,27 и 2,62 мН/м. При увеличении температуры растворимость второго компонента в метане увеличивается. Так, при температуре $T=150$ К добавление 1 мол.% низкокипящего компонента изменяет поверхностное натяжение раствора метан — азот на 0,16 мН/м, метан — водород — на 0,32 мН/м, а раствора метан — гелий — на 0,59 мН/м.

Получены температурные и барические зависимости капиллярной постоянной и поверхностного натя-

жения растворов. Концентрации низкокипящих компонентов в метане определялись по уравнению состояния растворов метан — азот, метан — водород и по литературным данным на линии фазового равновесия (раствор метан — гелий).

В докладе коллектива авторов: Мазанов С. В., Куагу Ж. М., Ункпатэн Д. Д., Фонкоу М. Д., Зарипов З. И., Гумеров Ф. М. (КНИТУ) описано **«Получение биодизельного топлива из масла дерева ши (карите) в сверхкритических флюидных условиях на установке периодического типа»**. Проведено экспериментальное исследование получения биодизельного топлива в процессе переэтерификации масла, получаемого из дерева ши (карите), в среде этанола в сверхкритических флюидных условиях при ультразвуковом воздействии на плохо смешивающуюся в атмосферных условиях реагирующую среду. Опыты выполнены при мольных соотношениях «этиловый спирт — масло ши» 30:1–42:1 в диапазоне температур 623–673 К при длительности реакции 10–30 минут и давлении 15–30 МПа на установке, реализующей периодический режим. Определены оптимальные условия проведения реакции (p , T , τ) и мольные соотношения исходных реагентов. Дополнительно приведены результаты по определению кинематического коэффициента вязкости исходного масла и продукта реакции переэтерификации на стандартных жидкостных вискозиметрах типа ВПЖ-2 при температуре 40 °С и атмосферном давлении. Данные по вязкости являются неотъемлемой частью в оценке качества биодизельного топлива, влияющие на прокачиваемость топлива и, в особенности, на качество его распыления. Максимальная конверсия масел в биодизельное топливо достигается при проведении реакции при мольном соотношении 42:1 и температуре 673 К. При этом значения коэффициента кинематической вязкости имеют минимальные значения.

При всех исследованных авторами диапазонах мольных соотношений и температур значения коэффициентов кинематической вязкости не соответствуют требованиям международных стандартов биодизельного топлива. Возможное решение данной проблемы — проведение реакции в непрерывном режиме и с использованием гетерогенных катализаторов различной химической природы.

Полученные результаты по инновационной технологии, реализующие суб- и сверхкритические флюидные условия в своей основе, во многом превосходят промышленно реализуемый процесс получения биодизельного топлива в плане уменьшения энергозатрат, длительности процесса и качества получаемого продукта. Данное биотопливо может стать присадкой к основному топливу (в количестве 2–20%) с целью улучшения его смазывающих и эксплуатационных характеристик, снизив расход топлива и улучшив экологические показатели.

Котов А. Н., Панасенко А. С. (Институт теплофизики УрО РАН) представили «Установку для импульсной генерации волны разряжения в жидкостях при низких температурах». Исследование свойств жидких сред, в том числе сжиженного природного газа (СПГ) и его компонентов, представляет собой актуальное направ-

ление в фундаментальной и прикладной науках. На сегодняшний день нет теории, позволяющей определить с достаточной точностью плотности жидкостей при отрицательных давлениях. Это выдвигает на передний план проведение соответствующих экспериментальных исследований. Методом определения плотности жидкости в данной работе является измерение показателя преломления с последующим расчетом плотности по формуле Лоренц — Лоренца.

Представлена экспериментальная установка с импульсной генерацией волны разрежения для измерения показателя преломления криогенных жидкостей при отрицательных давлениях. Установка позволяет проводить измерения в интервале длин волн от 600 до 1550 нм и давлениях до -5 МПа. Особенности установки является применение быстродействующего оптоволоконного датчика для измерения интенсивности оптического сигнала и настройки генерации волны давления-сжатия. Использование оптоволоконных каналов связи между блоками установки обеспечивает подавление помех при измерениях.

Работа выполнена по гранту РФФИ (проект № 18-19-00276-П).

Соколов М. И., Аксенов А. А., Данилишин А. М., Петров А. Ю., Кожухов Ю. В. (СПбПУ, Университет ИТМО) выполнили «**Анализ области применимости различных уравнений состояния метана для центробежных компрессоров установок СПГ**». Для расчетов термодинамических и газодинамических процессов, протекающих при сжатии метана в центробежном компрессоре, а также при проектировании его проточной части в целях повышения эффективности и надежности работы турбоагрегата необходимо использовать уравнения состояния реального газа. Высокая погрешность расчета свойств газа приводит к неправильной оценке многих геометрических и рабочих параметров центробежного компрессора, что, в свою очередь, приводит ко многим негативным последствиям и факторам: снижение КПД агрегата; увеличение потребляемой мощности компрессором (мощность на валу); не достижение необходимых рабочих параметров компрессора, указанных в техническом задании (недожатие, перегрев); риск возникновения аварийных ситуаций (вращающийся срыв, помпаж).

Дан анализ пяти уравнений состояния реального газа: модифицированное уравнение Бенедикта-Вебба-Рубина; уравнение NX19 мод.; уравнение Пенга-Робинсона; уравнение GERG-2008; уравнение AGA8. Для анализа и оценки точности данных уравнений состояния был выбран рабочий диапазон давлений и температур центробежного метанового компрессора установки СПГ, служащей для подготовки метана к сжижению. Компрессор сжимает метан до давления 3,7 МПа при начальной температуре окружающей среды. Область исследования от 270 до 450 К выбрана с учетом максимально возможной безопасной температуры среды в компрессоре (температуры вспышки рабочего масла подшипников турбоагрегата).

Исследование свойств метана в однофазной области показало следующее: модифицированное уравнение Бенедикта — Вебба — Рубина и уравнение NX19 мод.

не подходят для расчета метана при температурах и давлениях, используемых в центробежных компрессорах установок СПГ; уравнения GERG-2008 и AGA8 имеют невысокую степень погрешности при расчете плотности, теплоемкости при постоянном давлении и коэффициента сжимаемости метана, уравнение Пенга — Робинсона имеет зоны отклонений результатов расчета от эксперимента. Среднее отклонение данных, рассчитанных по уравнениям GERG-2008 и AGA8, не превышает 0,5% от экспериментальных данных, для Пенга — Робинсона этот показатель не превышает 2%.

При исследовании параметров метана на линии насыщения было выявлено следующее: модифицированное уравнение Бенедикта — Вебба — Рубина и уравнение NX19 мод. не подходят для расчета метана на линии фазового равновесия; уравнения Пенга — Робинсона, GERG-2008 и AGA8 имеют небольшие погрешности при расчете плотности метана, погрешность при расчете C_p ~2% (для уравнения Пенга — Робинсона этот показатель выше). Для расчетов метана на линиях конденсации и кипения данные уравнения подходят только для ориентировочных расчетов.

В докладе Баранова И. В., Киляшова А. А. (Университет ИТМО) рассмотрены «**Методы определения термических контактных сопротивлений биметаллических труб**». Аппараты воздушного охлаждения (АВО) получили широкое применение во многих отраслях промышленности. Главным конструктивным элементом таких аппаратов является биметаллические оребренные трубы (БМТ). Физической величиной, обратной тепловой проводимости, как известно, является эффективное термическое сопротивление. В случае биметаллических труб оно складывается из радиального теплового сопротивления самих труб и термического контактного сопротивления (ТКС) между ними. В наружной трубе термическое сопротивление оказывается характеристикой, зависящей не только от материала и толщины основной части трубы, но также от геометрии и шага ее ребер. Строгий расчет теплового сопротивления ребер обычно связан с определенными трудностями. Поэтому термическое сопротивление обеих труб, как и их ТКС, обычно оценивают экспериментально. Проблема экспрессного неразрушающего контроля ТКС биметаллических труб АВО остается актуальной, так как непосредственно связана с общей проблемой снижения энергопотребления многих промышленных технологических процессов.

Разработаны и экспериментально проверены две группы методов неразрушающего контроля ТКС БМТ: методы импульсного разогрева наружным или внутренним радиальным тепловым потоком и методы линейного разогрева. В импульсных методах используются закономерности начальной стадии нестационарного процесса разогрева рабочего участка биметаллической трубы. Методы импульсного нагрева основываются на закономерностях внутреннего теплообмена между трубами, а рабочий участок трубы подвергается воздействию интенсивного радиального (наружного или внутреннего) теплового источника постоянной мощности.

Разработанные методы и созданные на их основе автоматизированные приборы позволяют организовать

массовый неразрушающий контроль ТКС и отбраковку промышленных биметаллических теплообменных труб в заводских условиях непосредственно после их изготовления.

«К вопросу повышения энергетической эффективности утилизации органических отходов методом сверхкритического гидротермального окисления» — доклад Рахманова Ю. А., Сергиенко О. И., Корнатовского А. Ф. (Университет ИТМО). Отрицательное воздействие различных отраслей промышленности на окружающую среду определяется возрастающим потреблением природных ресурсов и образованием большого количества отходов, вызывающих загрязнение окружающей среды. Переработка отходов, содержащих органические соединения, в условиях сверхкритического водного окисления позволит не только решить экологические проблемы, но и получить дополнительную энергию. При сверхкритическом гидротермальном окислении достигается полнота переработки отходов не ниже 99,9% с возможностью получения парогазовой смеси в качестве рабочего тела, используемого для производства тепловой и электрической энергии. В статье рассматривается возможность энергоэффективной переработки органических отходов, используя сверхкритические свойства воды.

Родькин Я. Э., Рябова Т. В. (Университет ИТМО) выполнили **«Анализ возможности повышения энергоэффективности процессов транспортировки и хранения СПГ»**. Проведен анализ возможности повышения энергоэффективности процессов хранения и транспортировки СПГ путем контроля за изменением компонентного состава продукта с течением времени, а также учета внешних эксплуатационных условий термодинамической системы и внутренних процессов, возникающих вследствие стратификации криожидкости и неравномерного движения в ходе транспортировки.

Для описания изменения нестационарной системы с течением времени использованы итерационные расчетные модели, в которых начальными данными в нулевой момент времени принимаются исходные значения параметров системы, а для каждой последующей итерации — конечные результаты предыдущего временного шага. При этом появляется возможность, изменяя исследуемый временной промежуток (Δt), прогнозировать свойства системы пар — жидкость в любой конкретный момент времени. Выполнение последовательного итерационного расчета позволит определить параметры смеси как в узловых точках, так и в конкретный момент времени.

Сделан вывод о возможных способах повышения энергоэффективности исследуемых процессов: постоянный контроль состояния криогенной системы, применение итерационной модели для прогнозирования, изучение основных источников потерь и создание методов для их снижения, обеспечение герметичности системы при осуществлении логистических операций.

«Преимущества каскадных холодильных установок при работе на R744 в циклах верхней ступени» определены в докладе Хрёкина А. С. (Университет ИТМО). По результатам проведенного сравнения и термодинамического анализа циклов и составляющих про-

цессов холодильных машин были получены следующие результаты:

— для верхнего каскада предпочтительны экологически безопасные нетоксичные хладагенты с низкими показателями глобального потепления (GWP) и класса пожарной опасности A1, однокомпонентные, азеотропные или зеотропные смеси с незначительным температурным глайдом;

— указанным требованиям из разрешенных в настоящее время и возможных к применению в рассматриваемых условиях отвечают хладагенты R134a, R404A, R450A, R507A, R1234yf. Однако все из перечисленных хладагентов, кроме дорогостоящего R1234yf (различие на порядок), не отвечают требованиям Регламента Европейского Союза № 517/2014 на использование хладагентов группы ГФУ;

— удовлетворяют экологическим требованиям с эксплуатационными ограничениями пожароопасные природные хладагенты: углеводороды и аммиак. Из них для каскадных холодильных систем применяют, в основном, аммиак (R717) и редко пропан (R290), что связано также с ограниченной номенклатурой выпускаемого оборудования для его использования в холодильных системах.

В связи с этим для сравнительного анализа двухступенчатых и каскадных циклов для верхнего каскада приняты хладагенты R134a, R507A, R1234yf и R717.

Анализ энергетических показателей циклов верхней ступени при работе на R744 и верхнего каскада при работе на рассматриваемых выше хладагентах показал преимущества каскадного варианта, особенно для условий, когда транскритический режим работы на CO₂ преобладает.

«Расчетное исследование технологической схемы установки сжижения природного газа производительностью 2 млн тонн в год» выполнили Фатеева Е. С., Аксенов А. А., Кожухов Ю. В. (Университет ИТМО). Актуальность проектов СПГ заключается в том, что они могут быть применены для хранения и транспортировки газа, регулирования пиковых нагрузок, заправки транспорта, получения холода при регазификации и т. д. Для расчетного исследования был выбран детандерный цикл сжижения среднего давления. Он сочетает относительную простоту конструкции по сравнению со сложными каскадными циклами и большую производительность (15% вместо 5%) по СПГ по сравнению с дроссельными циклами.

В исследовании в качестве рабочего тела рассматривается природный газ с месторождения Газли с составом: CH₄–0,942; C₂H₆–0,025; C₃H₈–0,0038; C₄H₁₀–0,0024; N₂–0,026; CO₂–0,0013. Параметры газа на входе в установку: температура 30 °С, давление 50 атмосфер. Производительность по СПГ — 2 млн тонн в год. Это соответствует среднетоннажному заводу, преимущества которого — сокращенные сроки разработки, возможность реализации удаленных месторождений и т. д. В результате расчета цикла были получены параметры газа в узловых точках цикла и построена T-S-диаграмма цикла.

Для нужной производительности требуется цех из 26 параллельно работающих стенов СПГ. Состав

каждого стенда: компрессорная установка 4ГЦ2-130/6–65, детандерногенераторный агрегат ДГА-10, три кожухотрубных теплообменника, трубопроводная, регулирующая и запорная арматуры, вспомогательное оборудование. Ориентировочно площадь цеха сжижения составит 2500 м², потребление энергии — около 164 МВт.

Среднетоннажные технологии позволяют обеспечить гибкость в производстве и сокращенные сроки реализации проектов. Разработка реальных проектов сжижения природного газа требует индивидуальной проработки деталей и учета внешних факторов.

Тема доклада Наумова Ф. В., Шерматовой Ф. М. (Университет ИТМО) относится к **«Оптимизации технико-экономических характеристик схемы регазификации криопродуктов с атмосферным испарителем»**. В настоящее время существует больше десятка различных модификаций для схемы регазификатора криогенных продуктов с атмосферным испарителем. Однако не все из представленных в статьях и патентах вариантов оценены с экономической точки зрения. Также не все схемы, которые имеют некоторые преимущества в технических показателях, используются на практике. Данная работа посвящена сравнению и поиску путей оптимизации схемы регазификатора криопродуктов. Рассмотрена «классическая» компоновка регазификатора, включающая криогенную емкость, испаритель наддува давлением, крионасос и производционный испаритель. Рассмотрен вариант включения в схему вентиляторов и электронагревателей. В интересах использования атмосферных испарителей в холодной климатической зоне учтено догревание продукционного газа до положительной температуры. Для расчетов использована собственная методика расчета атмосферных испарителей. Методика реализована в виде программы, составленной на алгоритмическом языке Фортран 90. Программа прошла тестовые испытания, которые выявили максимальную погрешность в 8%. Данные для проверки, а также для расчетов технико-экономических характеристик схем регазификаторов были взяты из открытых источников: статей, каталогов, интернет-ресурсов. В результате анализов расчетов сделаны выводы о преимуществе догрева природного газа теплотой от сжигания части потока. Классическая схема при использовании установки более двух лет выгоднее схемы, включающей вентиляторы и электронагреватели.

В заключение кратко описаны другие варианты схем газификаторов криопродуктов. Приведены основные направления улучшения технико-экономических характеристик газификаторов.

В докладе Кожухова Ю. В., Данилишина А. М. (Университет ИТМО) обсуждаются **«Компрессорные технологии в задачах декарбонизации в нефтегазовой отрасли»**. Декарбонизация является одним из приоритетных направлений развития в нефтегазовой отрасли в мире. Проблематика выбросов парниковых газов на планете регулируется рядом международных документов. Российская Федерация является участником международных процессов по декарбонизации в промышленности и нефтегазовой отрасли. На основании своего международного участия РФ разработала и при-

няла на правительственном уровне ряд документов, предусматривающих снижение выбросов и утилизацию парниковых газов в стране. Выбросы парниковых газов в настоящее время оцениваются в эквивалентных тоннах CO₂. Одним из необходимых инструментов по оценке эффективности программ по декарбонизации применительно к организациям является ESG-рейтинг предприятий. В нефтегазовой отрасли актуальными мероприятиями по уменьшению выбросов парниковых газов являются: борьба с утечками природного и попутного нефтяного газа (ПНГ), утилизация ПНГ, технологии CCUS (Carbon capture, utilization and storage — улавливание, утилизация и хранение диоксида углерода). В мировой практике нефтегазовых компаний диоксид углерода применяется в методах увеличения нефтеотдачи (CO₂ — МУН). При насыщении нефти CO₂ происходит значительное уменьшение ее вязкости, а также определенное увеличение объема. Все это способствует увеличению нефтеотдачи пластов. Закачка CO₂ может осуществляться компрессорами в газообразном или сверхкритическом состоянии, насосами в жидком состоянии. Недопустимо наличие жидкой фазы или сверхкритического состояния для поршневых и мембранных компрессоров. Для закачки сверхкритического CO₂ используются центробежные и винтовые компрессоры. Также используются установки для закачки жидкого диоксида углерода. В таких установках компрессоры сжимают CO₂, не доходя до его сверхкритического состояния. После этого газ охлаждается, переходит в жидкую фазу, затем поступает в насос, который закачивает жидкий CO₂ в пласт. Используемые авторами методы расчета компрессорного оборудования и опыт проектных расчетов позволяют произвести необходимые газодинамические расчеты при проектировании компрессоров для задач декарбонизации нефтегазовой отрасли.

Карташов С. В., Кожухов Ю. В. (Университет ИТМО) выполнили **«Обоснование выбора расчетной области в задачах моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежного компрессора криогенных установок»**. Рассматривается вопрос определения расчетной области проточной части (ПЧ) при численном моделировании (RANS-подход) вязкого потока газа в малорасходной ступени центробежного компрессора с условным коэффициентом расхода $\Phi=0,008$. Обсуждаются несколько вариантов замены конструкционной сборки проточной части модельной ступени газодинамической моделью: основной рабочий тракт ступени; основной рабочий тракт ступени с учетом входного участка — патрубков и обтекатель; основной рабочий тракт ступени с учетом притрактных областей с полным и частичным присоединением к проточной части; основной рабочий тракт ступени с учетом поверхностей трения ступицы рабочего колеса. Показано, что в случае осевого всасывания в ступень входной патрубков и обтекатель не оказывают существенного влияния на профиль параметров перед рабочим колесом и газодинамические характеристики ступени. Моделирование без притрактных областей показывает неудовлетворительный качественный и количественный результаты. Наиболее актуальный вариант учета потерь дискового трения и протечек — полное двустороннее

соединение притрактных областей по дискам рабочего колеса с проточной частью, т. к. при соединении только на выходе из рабочего колеса моделируются потери трения и протечек, но не учитывается влияние на поток в рабочем колесе. В некоторых случаях важен учет дополнительных областей, участвующих в потерях трения.

Данилишин А. М., Аксенов А. А., Кожухов Ю. В. (Университет ИТМО) отметили **«Неопределенность моделирования высоконапорных ступеней концевых типа центробежных компрессоров турбохолодильных машин инструментами CFD»**. Высоконапорные ступени концевых типа центробежных компрессоров (ЦК) применяются в турбодетандерах на объектах газовой инфраструктуры в составе низкотемпературных установок комплексной подготовки газа, на станциях охлаждения газа, производстве сжиженного природного газа. Также высоконапорные ступени широко применяют в воздушных турбохолодильных машинах, чиллерах, тепловых насосах. В настоящий момент в процесс проектирования внедрены методы вычислительной газодинамики CFD (Computational Fluid Dynamics), позволяющие проводить численное моделирование рабочих процессов в ступени ЦК. Такой подход позволяет провести серию вариантных расчетов на стадии проектирования и значительно уменьшить число натурных доводочных экспериментов или вообще отказаться от таковых. Неопределенность моделирования — важный параметр, определяющий точность и достоверность численного моделирования инструментами CFD, поэтому должен быть определен и учтен в процессе проектирования ЦК. В работе исследован ряд из 12 высоконапорных модельных двухзвенных ступеней с коэффициентом теоретического напора ψ_r , равным 0,74–0,88, в диапазоне условного коэффициента расхода Φ_p от 0,056 до 0,12. Моделирование выполнялось с использованием модели турбулентности SST методами вычислительной газодинамики в программной среде Ansys CFX. Для расчетных моделей проведена процедура верификации и валидации с экспериментальными данными с разработкой рекомендаций по проведению численного моделирования. В целом, в диапазоне экономичной работы для высоконапорных ступеней (ОРК+БЛД) с $\psi_r=0,74$ в диапазоне расходности $0,064 < \Phi_p < 0,1$ максимальная средняя неопределенность для коэффициента внутреннего напора (ψ_i) составляет 3,8%, для коэффициента теоретического напора (ψ_r) — 2,3%, для коэффициента политропного КПД по полным параметрам ($\eta_{п}^*$) — 1,8%, для коэффициента политропного напора по полным параметрам ($\psi_{п}^*$) — 4,7%. Неопределенность моделирования отношения давлений по полным параметрам (P^*) не более 4%, что соответствует уровню инженерной погрешности испытаний, определяемой стандартом ISO 5389:2005 (en) Turbocompressors — Performance test code.

«Анализ энергетической эффективности комбинированного цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины» выполнили Малинина О. С., Бараненко А. В., Клунник А. К., Аль-Фураиджи М. А. О., Комаров К. А. Проведено исследование энергетической эффективности действительного термодинамического комбинированного цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатой абсор-

бцией и трехступенчатой генерацией (тип 2) в широком диапазоне изменения параметров внешних источников. Исследуемый цикл состоит из двух параллельно соединенных ступеней: одноступенчатого цикла абсорбционного бромистолитиевого повышающего термотрансформатора и цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатой генерацией и прямоочной подачей раствора по ступеням генератора. Определены необходимая для осуществления термодинамического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины температура греющего источника и действительный тепловой коэффициент.

Скрипкина Т. В., Ермаков М. А. (РКММП) рассмотрели **«Энергосберегающие технологии при проектировании холодильной установки»**. Цель работы — спроектировать холодильную установку на хладагенте R407C для хранения охлажденных ягод в количестве 25 т с использованием энергосберегающих технологий, проанализировать и сравнить результаты по критерию потребления электроэнергии. Рассмотрен холодильный цикл с переохлаждением перед терморегулирующим вентилем для роста общей холодопроизводительности установки и уменьшения массового расхода рабочего вещества, что снижает потребление энергии.

С помощью программы GEA BOCK Software VAP 11.1 выбран поршневой компрессор фирмы BOCK с передовыми техническими решениями, реализующие оптимизацию расхода электроэнергии. Применение электронных контроллеров для оптимизации работы холодильной установки в зависимости условий эксплуатации, контроль давления испарения и конденсации с помощью частотно-регулируемых вентиляторов позволяют уменьшить потребление электроэнергии холодильной установкой.

По программе Travel выполнен тепловой расчет холодильной камеры с использованием сэндвич-панелей из пенополиуретана и с минераловатным наполнителем. Проведено сравнение и выбор материала с лучшими теплоизоляционными свойствами.

Согласно выполненным расчетам энергопотребление номинальной холодильной установки составило 200 кВт·ч. Каждое мероприятие индивидуально может сократить потребление энергии от 5 до 10%. Гармоничное сочетание ряда мероприятий может сохранить от 20 до 35% энергии, потребляемой холодильной установкой.

Сообщение **«Из истории рефрижераторного флота»** (Пастухов А. С., МОО «Северо-Запад», Громцев А. С., СПбГЭУ) посвящено судьбе теплохода-рефрижератора «Кура», который по заказу СССР был построен в ФРГ в 1960 г. в городе Киль по проекту конструкторского бюро судоверфи «Kielер Howaldtswerke». Спуск корабля на воду состоялся 16 августа 1960 г. Всего в 1960–61 годах для Советского Союза на данной верфи было построено 3 судна (тип «Арагви»), которые изначально работали в составе Черноморского морского пароходства (порт приписки — Одесса), а в 1963 г. были переведены в Латвийское морское пароходство (порт приписки — Рига).

Рефрижераторы подобного типа предназначались для перевозки бананов, цитрусовых, мяса и других охлажденных и замороженных продуктов. Они представляли

собой четырехпалубное судно с надстройкой в средней части. Район плавания — неограниченный, дальность плавания — 16000 миль. Экипаж состоял из 48 моряков. Длина судна — 120,54 м, ширина — 16,40 м. Судно имело 4 рефрижераторных трюма общим объемом более 5 тысяч кубических метров. Воздушная система охлаждения трюмов на базе 4 компрессоров марки «F-8» на хладагенте R12 обеспечивала температуру воздуха до -18°C .

31 октября 1976 г. после выхода в рейс из Ленинграда на Гавану (Куба) с грузом свиного жира в 7 ч 10 мин на скорости 17 узлов рефрижератор «Кура» наскочил на скалу рядом с островом Соммерс. Груз был частично снят, а сам корабль из-за тяжелых повреждений корпуса, полученных во время последующих штормов, разломился.

В ходе реализации проекта «Острова Памяти», участниками которого были и студенты мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Университета ИТМО, был проведен архивный поиск сведе-

ний, касающихся внешних островов Финского залива — Гогланд и Соммерс.

Остров Соммерс и скала Малый Соммерс территориально относятся к Выборгскому району Ленинградской обл. Остров Соммерс — небольшой: длина чуть меньше километра и ширина 450 метров. В послевоенное время население острова состояло из семей служителей находящегося на острове маяка, а также пограничников в составе поста радиотехнического наблюдения. В настоящее время остров необитаем.

Председатель Рабочей группы «Свойства хладагентов и теплоносителей» Национального комитета по теплофизическим свойствам веществ РАН и секции «Теродинамические основы холодильной и криогенной техники» Международной академии холода Цветков О. Б. информировал собравшихся о деятельности Рабочей группы в 2021 г., планах работы на 2022 г., а также о тематике предстоящей научно-технической конференции в начале 2023 г. в Санкт-Петербурге.

*Председатель Рабочей группы
«Свойства хладагентов и теплоносителей»
академик МАХ Цветков О. Б.,
ученый секретарь Рабочей группы
академик МАХ Лаптев Ю. А.*



АГРОРУСЬ

Международная агропромышленная выставка-ярмарка

АГРОРУСЬ-2022

Выставка «АГРОРУСЬ» проводится

31 августа – 3 сентября 2022 г.

Ярмарка региональных продуктов «АГРОРУСЬ»

26 августа – 4 сентября 2022 г.

АГРОРУСЬ: Перезагрузка – агропромышленный конгрессно-выставочный форум, ориентированный на создаваемую отечественную агропищевую индустрию будущего – Foodnet.

Шагая в ногу со временем, выставка АГРОРУСЬ трансформировалась в Проект, отвечающий актуальным трендам развития АПК: цифровизации, экологизации, обеспечению продовольственной безопасности.

Проект АГРОРУСЬ: Перезагрузка направлен на развитие агропромышленной инфраструктуры и обеспечение продовольственной безопасности Северо-Западного федерального округа и расширение межрегионального сотрудничества субъектов Российской Федерации.

В 2022 году тематический фокус АГРОРУСЬ: Перезагрузка – агропищевая индустрия.

В повестке Проекта: решение вопросов производства и переработки сельхозпродукции, а также проблематика, связанная с хранением, логистикой и сбытом конечного продукта и дальнейшей утилизацией.

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- ✓ Сельскохозяйственная техника
- ✓ Оборудование для АПК
- ✓ Растениеводство сельскохозяйственных культур
- ✓ Средства защиты растений. Агротехника
- ✓ Животноводство. Корма и комбикорма. Ветеринария
- ✓ Продукты питания
- ✓ Напитки (Кухня регионов «От поля до прилавка»)
- ✓ Услуги для АПК. Научное обеспечение. Управление

<http://agrorus.expoforum.ru/>

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Контакты:

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40, доб.2235
E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»

Петербургское шоссе 64, корпус 1,
павильоны F, G