

УДК 53.096

## Криогеника в начале XXI века

Канд. техн. наук, доцент, проф. **Зайцев А.В.** zai\_@inbox.ru

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В данной статье приводится краткий обзор и анализ состояния криогеники в России и в мире в первом десятилетии 21 века. Отражена публикационная активность специалистов в области криогенной техники, которая показывает широкий диапазон научных интересов и направлений развития данной области науки и техники. Показано, что основными направлениями развития криогенной техники являются криобиология, получение и ожижение промышленных газов, их хранение и транспортирование, микрокриогенная техника, гелиевые технологии, применение водорода в металлургической, химической промышленности и космонавтике, получение и применение высокотемпературной сверхпроводимости и др. Проведена сравнительная экономическая оценка состояния отечественной и мировой криогеники. Отражены основные проблемы российской криогеники и необходимые действия для их понимания и преодоления. Перечислены стратегические направления развития криогеники на ближайшее будущее.*

**Ключевые слова:** криогеника, физика низких температур, промышленные газы, ожижение, высокотемпературная сверхпроводимость.

---

## Cryogenics at the beginning of the XXIst century

**Zaitsev A.V.** zai\_@inbox.ru

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

9, Lomonosov Street, St Petersburg, 191002

*In this article there is given a short review and an analysis of cryogenics state in Russia and in the world in the first decade of the 21<sup>st</sup> century. Here is reproduced the publication activity of specialists in the field of cryogenic technique which shows a wide range of scientific interests and development directions of this area of science and technique. It is shown that the main development directions of cryogenic technique are cryobiology, receiving and liquefaction of industrial gases, their storage and transportation, microcryogenic technique, helium technologies, using hydrogen in the metallurgical, chemical industries and in astronautics, receiving and using high-temperature superconductivity, etc. The comparative economic assessment of the state of domestic and world cryogenics is carried out. Here are reflected the main problems of Russian cryogenics and necessary actions for their understanding and overcoming. The strategic development directions of cryogenics in the nearest future are also listed.*

**Keywords:** cryogenics, low-temperature physics, industrial gases, liquefaction, high-temperature superconductivity.

---

Криогеника, как и любая современная эффективная и развивающаяся отрасль науки и техники, нуждается в постоянном уточнении терминологии. В то время как *криология* – это наука о холоде в целом, *cryology* – наука о природных объектах и процессах, происходящих в криосфере земли, наука о воздействии холода на физические тела. Под *криогеникой* понимают технологии и аппаратно-методические средства работы в условиях низких температур, а *cryogenics* – отрасль физики, изучающая свойства материалов и явления, происходящие при низких температурах. В Википедии

криогенику отождествляют с *криогенной техникой*, для которой согласно международному соглашению диапазон температур распространяется от температуры получения жидкого гелия под вакуумом (0,7 К) до температуры конденсации природного газа (ниже 120 К).

На практике все научно-технические приложения в области отрицательных температур условно разделяют на холодильные – ниже 0 °С, и криогенные – выше 0 К, с некоей условной переходной областью. К физике низких температур также относится область криогенных температур вплоть до абсолютного нуля.

Анализ публикационной активности за последние годы только по одному российскому профильному журналу «Вестник МАХ» показывает широкий диапазон научных интересов специалистов в области криогеники. К вопросам криобиологии относятся получение талой воды [1], криотерапия [2], крионика [3], криохирургия [4]. Физика низких температур представлена в статьях, связанных с криоэлектроникой [5], калорическими эффектами [6], сверхпроводимостью [7]. Развивается методология теоретических исследований [8]. Анализ процессов в базовом оборудовании криогеники – криогенных машинах [9] и аппаратах [10] направлен на повышение энергоэффективности, а аспекты технологий, связанных с промышленными газами – получение и ожижение сверхчистых промышленных газов [11], их хранение и транспортирование, регазификация СПГ [12], – являются предметом экономических интересов многих стран мира.

И это далеко не все области применения низких температур. Один из ведущих отечественных учёных – криогеников А.М. Архаров в своём анализе состояния криогеники в стране на рубеже XX–XXI веков [13] отметил в первую очередь технологии, связанные с промышленными газами, являющимися по принципу получения и применения криопродуктами:

- создание воздухоразделительной установки нового поколения КААр-30М производительностью 34 тыс.  $\text{нм}^3/\text{ч}$  технического кислорода (99,5 %  $\text{O}_2$ ), 40 тыс.  $\text{нм}^3/\text{ч}$  азота и 1000  $\text{нм}^3/\text{ч}$  аргона с возможностью извлечения Kr–Xe и Ne–He смесей и жидкого кислорода;

- системы кислородного обеспечения экипажей летательных, подводных и космических аппаратов, криогенные стартовые ракетные комплексы;

- использование водорода в космонавтике в качестве топлива жидкостных ракетных двигателей, в то время как на Западе основная доля получаемого водорода потребляется металлургической и химической промышленностью;

- использование метана на автомобильном транспорте (и в перспективе в авиации);

- разработка сравнительно небольших ожижительных станций метана ( $\text{CH}_4$ ) и водорода ( $\text{H}_2$ ) производительностью около 1 т/ч;

- создание эффективных отечественных установок нового типа для разделения криптоно-ксеноновой смеси;

- применение для осушки и очистки воздуха блоков комплексной очистки, выполненных по двухслойной схеме цеолит NaX–алюмогель с удельным расходом электроэнергии 0,39–0,4 кВт·ч/ $\text{нм}^3 \text{O}_2$ ;

- существенное увеличение за счёт применения низкотемпературных технологий чистоты газообразных продуктов разделения, используемых в нанотехнологиях, и

доведение содержания примесей в одном нормальном кубическом метре газа высокой чистоты до 10–100 мм<sup>3</sup> в 1 м<sup>3</sup>;

– уникальный отечественный опыт разработки эффективных водородных турбодетандеров для ожижителей водорода;

– создание и испытание экспериментальных мини-ожижителей кислорода и мини-ВРУ производительностью около 40 г/ч жидкого O<sub>2</sub>.

Продолжается разработка, создание и усовершенствование различных криогенных машин, аппаратов, установок и их элементов. К ним относятся:

– криовакуумная камера;

– криоадсорбционные насосы;

– структурные насадки для насадочных ректификационных колонн;

– теплообменная аппаратура;

– микрокриогенные системы;

– криогенные системы с использованием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) для передачи больших потоков энергии;

– магнитные опоры из высокотемпературных сверхпроводящих материалов для быстровращающихся валов;

– новые оригинальные электрические машины и магнитные системы с ВТСП обмотками с жидкостным азотным охлаждением;

– экологически более чистые ядерные реакторы на <sup>3</sup>He;

– охлаждаемые неоновые и неоно-гелиевые низкотемпературные установки;

– низкотемпературные установки для утилизации отходов;

– волновые криогенераторы и др.

Проанализируем для сравнения содержание одного из Западных профильных научных журналов «Cryogenics» за 2013 год.

Всего было опубликовано 80 научных статей. Из них вопросам физики сверхнизких температур посвящено 39 статей, микрокриогенике и пульсационным трубам – 19 статей, теплообмену и гидродинамике в криогенных устройствах, свойствам веществ при низких температурах – 10 статей, экспериментальному криооборудованию (аппараты, трубопроводы и др.) – 8 статей. Значительное количество публикаций базируется на результатах физического эксперимента, проводимого на реальных высокотехнологичных и наукоёмких установках и системах:

– Международный экспериментальный ядерный реактор ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor);

– Большой андронный коллайдер LHC (Large Hadron Collider);

– Лаборатория трития в Карсруэ, эксперимент по изучению самых важных открытых проблем в физике нейтрино KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment);

– исследование криокулеров на базе пульсационной трубы РТС (pulse tube cryocooler);

– исследование высокотемпературной сверхпроводимости HTS (high temperature superconductor).

Подавляющее большинство публикаций включает результаты численных экспериментов на основе сложного математического моделирования процессов с применением специализированных программных систем:

– HELIOS (HElIum Loop for hIgh LOads Smoothing);

- 4C (Cryogenic Circuit Conductor and Coil);
- CtFD (Computational thermal Fluid Dynamics);
- CFD (3D Computational Fluid Dynamics);
- FEM (Finite Elements Method) – метод конечных элементов;
- FLUENT, GAMBIT;
- COMSOL Multiphysics;
- GANDALF и FLOWER и др.

По принадлежности к различным странам мира авторство распределяется следующим образом: Китай – 20 статей, США – 9, Италия – 9, Германия – 6, Швейцария – 6, Франция – 6, Корея – 5, Финляндия – 4, Иран – 3, ... Россия – 1.

Издательство Springer посвятило вопросам криогеники отдельную серию книг: «International Cryogenics Monograf Series». В 2012–13 годах вышло 2 монографии. В книге, посвящённой криогенным микрохолодильникам, работающим на эффекте Джоуля-Томпсона [14], помимо истории развития устройств (книга содержит 1779 ссылок) отражены многие аспекты расчёта, проектирования и эксплуатации микрокулеров: теоретические основы и экспериментальные результаты; применение циклов замкнутого и разомкнутого типов; применение предварительного охлаждения с помощью газовых машин Стирлинга или термоэлектрических охладителей; различные типы теплообменников; переходные процессы; применение чистых азота, аргона или многокомпонентных смесей для быстрого охлаждения; достижение рабочих температур в диапазоне от комнатных до температур менее 4 К.

Гелиевые технологии подробно рассматриваются в [15]. В книге отражены последние достижения в изучении одно- и двухфазных потоков He I, тепло- и массоперенос в сверхтекучем He II. При этом дан обзор термодинамических законов, проанализированы свойства материалов при низкой температуре, в том числе материалов, используемых в сверхпроводящих магнитных системах, криокулерах, а также контактное тепловое сопротивление. В отдельных главах рассмотрены динамика и теплопередача в гелии выше  $\lambda$ -перехода, механика жидкости при различных термодинамических состояниях: принудительное движение сверхкритического гелия в трубах и в системе сверхпроводящего кабеля (Cable in Conduit Conductors, CICC), вынужденное движение двухфазного потока, естественная циркуляция, потоки в пористых средах, кипение в большом объёме. Даны практические и теоретические иллюстрации переходных процессов, критических тепловых потоков, плёночного режима кипения. Также приведены обзор ожигительных и рефрижератерных режимов, адсорбция гелия, магнитное охлаждение, анализ тепловой изоляции.

Из российских монографий, вышедших в последнее время, следует отметить учебник [16] и монографии [17, 18].

Можно сделать вывод, что в начале XXI века существует обширный и постоянно расширяющийся спектр применения криогенных технологий, однако наблюдается некоторое отклонение вектора развития российской криогеники от приоритетов наиболее экономически развитых стран мира.

Характерным с этой точки зрения является обзор российского и зарубежного рынков криогенного оборудования, выполненный российской Исследовательской компанией Research.Techart по заказу ООО «Партнер» в 2012 году [19].

Всё оборудование разделено на 7 (неравнозначных) сегментов. В 1-й сегмент входят воздухоразделительные установки и установки по ожижению водорода, гелия и природного газа. Следующие 4 сегмента – комплектующие для этих установок, куда наравне с сегментом «Криогенная арматура» входит сегмент «Оборудование для получения криогенных температур», включающий детандеры и теплообменники. Последние сегменты – «Криогенные резервуары, системы хранения и газификации» и «Криогенное научное, медицинское и биологическое оборудование (криотерапевтические аппараты, криостаты, сосуды Дьюара)». Такое деление достаточно поверхностно, поэтому результаты исследования можно принять к сведению лишь в качестве приближённой оценки с определённой долей вероятности.

Объём мирового рынка криогенного оборудования в 2011 году, по оценке Research.Techart, составил 61,1 млрд. долларов. Объём российского рынка криогенного оборудования в ценах производителей в 2011 году составил 7,9 млрд. рублей, что составляет менее 0,5 % мирового рынка. Поэтому вывод, что российский рынок с показателем среднего ежегодного прироста за 2007–2011 годы 15,7 % по сравнению с общемировым уровнем 8 % является одним из наиболее динамичных рынков в мире, является некорректным.

На рис. 1 представлена структура главных сегментов рынка реализуемой продукции. Следует отметить, что подавляющий объём мирового рынка связан с промышленными газами. Оборудование для поставок сжиженных и сжатых газов составляет 62 %, оборудование для разделения или ожижения газов – 19 %. В России же ВРУ и ожижительные установки составляют 70 % от всего объёма продаж, а криогенные резервуары, системы хранения и газификации (оборудование для поставок сжиженных и сжатых газов) – всего 16 %, что характерно для российского рынка в связи с низким развитием торговли сжиженными и сжатыми газами.

Мировыми лидерами рынка криогенного оборудования являются компании Praxair,

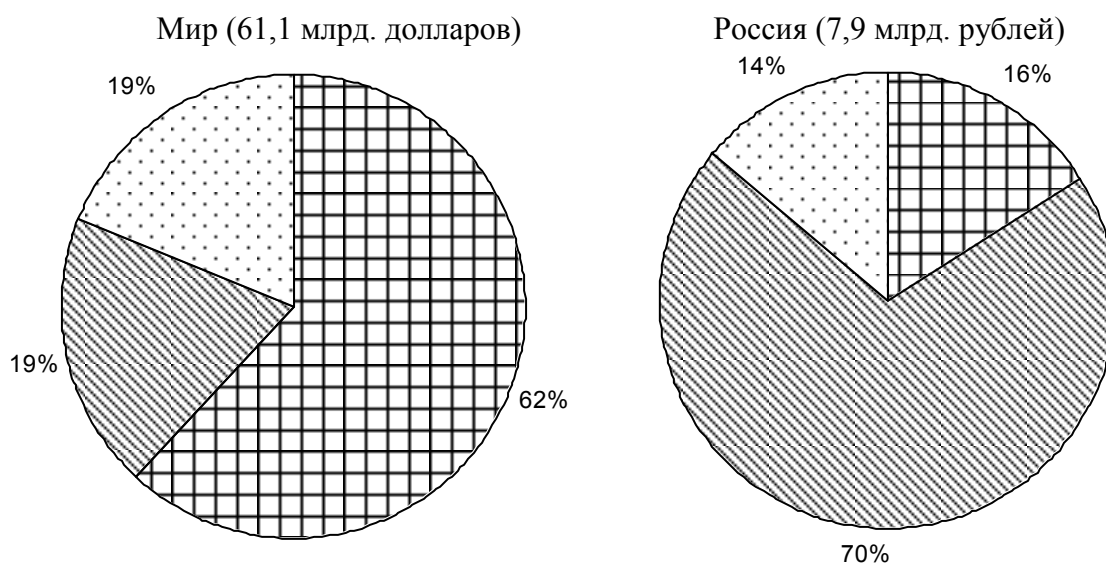





Рис. 1. Структура основных сегментов рынка:

-  – оборудование для поставок сжиженных и сжатых газов;
-  – оборудование для разделения/ожижения газов;
-  – другое.



Air Liquide, Linde Group, Taiyo Nippon Sanso, Airgas Inc. Суммарная выручка этих компаний на рынке мирового криогенного оборудования по итогам 2011 года составила 34,7 млрд. долларов, или более 50 % продаж.

Распределение сегмента отечественного рынка воздухоразделительных установок и установок по ожижению водорода, гелия и природного газа в 2011 году по производителям приведено на рис. 2, откуда следует, что доля импортного оборудования в данном сегменте (выделено серым фоном) составляет 63 %. Основные тенденции связаны с ростом потребления азота, аргона и кислорода в металлургии и нефтехимии, т.е. с поставкой ВРУ с комплексным извлечением продуктов, с выдачей продуктов в жидком виде или под давлением и возможностью плавного регулирования производительности. Растёт интерес к технологиям по использованию сжиженного природного газа (СПГ).

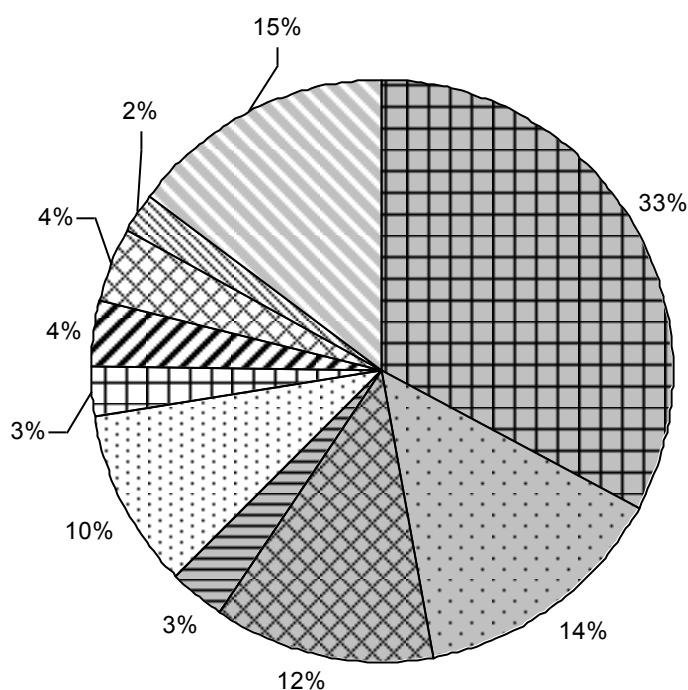


Рис. 2. Структура рынка ВРУ и ожижительных установок России в 2011 году по производителям:

- |  |                               |  |  |
|--|-------------------------------|--|--|
|  | – Air Liquide;                |  | – Praxair;                             |
|  | – Linde;                      |  | – Suzhou Oxigen;                       |
|  | – ОАО «Криогенмаш»;           |  | – ОАО НПО «Гелиймаш»;                  |
|  | – ЗАО НПК «Грасис»;           |  | – ОАО «Уральский компрессорный завод»; |
|  | – ОАО «НТК «Уралкриотехника»; |  | – другое.                              |

Согласно приведённым количественным данным российская криогенная техника в сравнении с мировой выглядит достаточно слабо. Тем не менее, мы обладаем накопленным потенциалом прошлых лет. Благодаря советским заделам, используя опыт

ракетных криогенных систем в области энергетики, Россия может оказаться в числе технологических лидеров по практическим применениям высокотемпературной сверхпроводимости [20].

В последнее время активизировалась деятельность по реализации новых проектов в ракетно-космической отрасли, в связи с чем увеличился спрос на крупные криогенные и вакуумные системы. Всё более заметную роль играют высокотемпературная сверхпроводимость и водород.

Рабочим веществом для современных ВТСП устройств является жидкий азот – он пожаро- взрывобезопасен в случае потери проводимости и взрыва сверхпроводника. Главной проблемой является создание материала – сверхпроводящей керамики, которая сейчас стоит около 250 долларов за метр. Несколько ВТСП-кабелей с азотным охлаждением работает в близких к эксплуатационным режимам в энергосистемах в Корею и Японии, известно об эксплуатации такого кабеля в энергосети Китая. Шесть таких кабелей стоят в энергосетях США, в том числе самый длинный 700-метровый в районе Нью-Йорка. В планах американцев – прокладка пятикилометрового кабеля.

С 2009 года 200-метровый кабель работает и в нашей стране. Для этого создана собственная оригинальная система охлаждения на базе неоновой рефрижератора и криогенного насоса, аналогичного насосу ракетного двигателя. По расчёту такая система позволит поддерживать необходимую температуру на участке ВТСП сети длиной 2,5 километра.

В конце 1980-х Россия получила приоритет, разработав первый в мире электродвигатель с использованием ВТСП материалов. Из-за нехватки финансирования мы вынуждены были работать с немецкой фирмой Siemens и довели мощность до 500 киловатт; изготавливается агрегат на 1000 киловатт.

Принципиально новые возможности открываются с 2001 года в связи с открытием нового типа сверхпроводника – дигборида магния ( $MgB_2$ ) с критической температурой около 39 К и стоимостью всего несколько долларов за метр. При водородных температурах плотность критического тока для  $MgB_2$  достигает  $10 \text{ кА/см}^2$ , то есть с его использованием можно получать огромные мощности. Но применение дигборида магния означает и переход с азотного на другой уровень температур, который обеспечивает, к примеру, неон или водород.

Водород используется для различных энергетических целей – в нефтехимии, оптоволоконной электронике, фармацевтике. В мире производится 60 миллионов тонн водорода в год (США – более 100 тыс. тонн). Потребление особо чистого электролизного водорода растет на 18 процентов в год. Идея технологии гибридной транспортной магистрали для передачи энергии по сверхпроводниковым электросетям на основе соединения дигборида магния, проложенным внутри трубопроводов для транспортирования жидкого водорода, уже не кажется труднодостижимой. Американцы уже сейчас собираются строить систему, которая будет состоять из емкости, откуда к заправкам пойдет разветвленная проводящая водородная линия, а источником энергии для перекачки будет служить сверхпроводящая электрическая сеть, проложенная внутри. В России проведён удачный эксперимент: построена водородная система с  $MgB_2$  проводником, работающем в ВТСП режиме.

Не меньший интерес в настоящее время проявляется и к самому трудноожижаемому газу – стратегическому материалу будущего [21] – гелию. Несмотря на то, что

существует развитая теория сверхпроводимости проводников, сверхтеплопроводности и сверхтекучести жидкого гелия, теория осцилляционных явлений, ученые продолжают исследования свойств веществ в экстремальных условиях.

Одним из обязательных условий успешного внедрения научных достижений в области физики низких температур является высокий уровень развития и использования микрокриогеники, которая уже выделилась в самостоятельную область науки и техники. Микрокриогенные системы и машины могут работать в нестационарных условиях при жестких перегрузках, вызванных механическими и климатическими воздействиями, при полной их автономности. Масса такой установки 3–12 кг, она транспортабельна и незаменима при проведении экспериментальных исследований, в медицине, в военной области и др.

Одним из главных факторов в развитии наукоёмких приложений криогеники являются космические исследования.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом разрабатывается множество спутниковых систем для работы на околоземных орбитах от 200 до 3000 км, которые должны быть испытаны в камерах, имитирующих в земных условиях космическое пространство. Имитатор, в котором был проведен весь комплекс испытаний космического корабля «Буран» имеет объем камеры 10000 м<sup>3</sup>, зона кипения азота вынесена из камеры, количество циркулирующего азота составляет 800 т в час [22]. Создание глубокого стерильного вакуума обеспечивается применением криогенных насосов, охлаждаемых жидким азотом, с использованием в корпусе насоса плоских криосорбционных кассет из пористого материала, заполненных цеолитом СаЕН-4В. Имитация «чёрного» космоса обеспечивается криоконденсационным насосом, по каналам которого циркулирует гелий при температуре 10 К. По защитным экранам циркулирует жидкий азот, воспринимая основную тепловую нагрузку.

В заключение остановимся на проблемах российской криогеники с целью их понимания и успешного преодоления [13, 19].

Следует признать неудовлетворительной таможенную политику государства. Российская таможенная пошлина на импорт аппаратов для дистилляции или ректификации жидких газов, на машины для сжижения воздуха или газов, на криогенные детандеры и теплообменники равна 0 %. Пошлина 15 % есть только на импорт криогенных систем хранения и газификации. Ёмкости зачастую ввозятся в страну по другим кодам ТН ВЭД с более низким значением пошлины. Такая ситуация делает зарубежную (например китайскую) продукцию более конкурентноспособной. Вступление России в ВТО еще сильнее укрепляет позиции иностранных компаний и повышает их долю на рынке криогенного оборудования.

В крупнотоннажной криогенике более 50 % производства кислорода, азота и аргона принадлежит зарубежным фирмам. Если и ОАО «Криогенмаш» будет куплено зарубежными компаниями, то реальной становится опасность окончательной потери отечественной крупнотоннажной криогеники. В таких условиях интерес к долгосрочным проектам по обеспечению техническими газами по схеме on-site также не способствует развитию отечественной криогенной промышленности.

В результате распада СССР были потеряны опытные кадры, в первую очередь специалисты на крупных предприятиях. Законсервированы или демонтированы установки по производству сжиженного природного газа производительностью до 20 т/ч



СПГ и система его хранения на 180 тыс м<sup>3</sup>, разработанные в НПО «Криогенмаш», ЛенНИИхиммаш, ЮЖНИИгаз, ВНИИгаз. Заморожены разработки высокотехнологичных потребителей криогенных продуктов, например не состоялся пассажирский самолет ТУ-156, несмотря на постановление правительства, непонятна судьба космического корабля «Буран», прекращены работы по развитию гелиевой тематики, потеряны важные зарубежные рынки, утеряно производство жидкого водорода в г. Чирчике, наблюдается снижение спроса на металлопродукцию сталелитейной промышленности и многое другое.

Однако в последние два года постепенно возобновляются инвестиции в модернизацию промышленных мощностей и существует надежда, что усилиями специалистов-криогеников с обязательной поддержкой высшими государственными органами российская криогеника останется на уровне Европы, Америки и Китая.

Стратегическими направлениями криогеники являются [13]:

- разработка и внедрение новых технологий получения, хранения и транспортировки сжиженного природного газа;
- разработка и внедрение современных технологий разделения и переработки природного газа с целью получения новых продуктов;
- производство жидкого параводорода на приливных электростанциях;
- получение энергии в ядерных реакторах с <sup>3</sup>He;
- сверхпроводящие ВТСП-системы консервации электроэнергии;
- системы хранения генофонда животных и растений;
- использование криогенных топлив в авиации (для машин типа ТУ-204);
- использование водорода в металлургии и химии;
- разработка космических и других программ, направленных на энергосбережение, защиту среды обитания, повышение качества жизни и др.

### Литература

1. Данилов К.П., Фокин Г.А. Энергосберегающая криогенно-газовая технология производства талой воды / Вестник Международной Академии Холода. – 2011, вып. 1. – С. 37–42.
2. Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Савельева А.В., Сидорова А.Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия / Вестник Международной Академии Холода. – 2012, вып. 2. – С. 35–40.
3. Кидалов В.И., Багаутдинов Ш.М., Данилова А.В., Сясин Н.И. Проблемы крионики на разных уровнях организации живого / Вестник Международной Академии Холода. – 2010, вып. 4. – С. 38–42.
4. Ханевич М.Д., Манихас Г.М., Фридман М.Х., Диникин М.С., Фадеев Р.В., Юсифов С.А. Криовоздействие при удалении печеночных метастазов рака толстой кишки / Вестник Международной Академии Холода. – 2011, вып. 4. – С. 30–32.
5. Захаров А.А., Серебров А.П. Криогенный цикл со сверхтекучим гелием / Вестник Международной Академии Холода. – 2011, вып. 4. – С. 12–16.
6. Зайцев А.В., Старков А.С., Пахомов О.В. Асимптотическое исследование нестационарного уравнения Ландау-Халатникова для определения электрокалорического

эффекта в теплоизолированном сегнетоэлектрике / Вестник Международной Академии Холода. – 2011, вып. 2. – С. 34–38.

7. Агеев А. И., Козуб С. С., Столяров М. Н. Криогенная система сверхпроводящего сепаратора для канала каонов ускорителя ИФВЭ / Вестник Международной Академии Холода. – 2013, вып. 3. – С. 6–10.

8. Зайцев А. В. Разработка алгоритма решения уравнений Навье-Стокса для течения криогенной жидкости в трубе 2011, вып. 3. – С. 37–42.

9. Колеснев Д. П., Молодов М. А., Прилуцкий А. И., Прилуцкий И. К. Применение метода конечных объемов при расчетном анализе рабочих процессов поршневого детандера / Вестник Международной Академии Холода. – 2012, вып. 1. – С. 53–58.

10. Иванов В. И. Газодинамические аспекты работы криовакуумного насоса в вязкостном режиме течения газа / Вестник Международной Академии Холода. – 2012, вып. 2. – С. 50–51.

11. Борзенко Е. И., Ярица В. А. К расчету фазового равновесия процессов разделения разбавленных растворов с получением особо чистых продуктов / Вестник Международной Академии Холода. – 2012, вып. 2. – С. 21–22.

12. Акулов Л. А., Зайцев А. В. Перспективы утилизации холода сжиженного природного газа при малотоннажной регазификации / Вестник Международной Академии Холода. – 2013, вып. 2. – С. 29–31.

13. Архаров А.М. Инженерная криология на рубеже веков. Сайт: Новые технологии – инжиниринг. <http://www.ntds.ru/>

14. Ben-Zion Maytal, John M. Pfothauer. Miniature Joule-Thomson Cryocooling: Principles and Practice. Series: International Cryogenics Monograph Series. Springer, 2013, 380 p.

15. Steven W. Van Sciver. Helium Cryogenics. 2nd ed. 2012, XXIV, 470 p.

16. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник / А.М. Архаров, И.А. Архаров, А.Н. Антонов и др.; под общ. ред. А.М. Архарова и И.К. Буткевича. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 582 с.

17. Олейников Л.Ш.. Криооптические системы: – С-Пб.: «ИПК «КОСТА», 2013. – 352 с.

18. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 507 с.

19. Исследовательская компания Research.Techart. Маркетинговое исследование российского рынка криогенного оборудования. 29.06.2012. <http://research-techart.ru/report/cryogenic-facilities-market.htm>

20. Костюк В.В. Не такие уж и низкие температуры // Эксперт. № 35 (817), 2012. Сайт: Эксперт Online «Русский репортёр». <http://expert.ru/expert/2012/35/>

21. Карелин П.К. Физика низких температур (Краткий исторический очерк) / ООО «НТК «Криогенная техника». – С. 9–20.

22. Филин Н.В. Киогеника – этапы развития // Труды кафедры «Холодильная и криогенная техника» МГУИЭ / Сборник научных статей под ред. профессора И.М. Калниня. – М.: 2006.