
Секция 1.2. Криогенная техника

Новые криогенные, СВЧ и лазерные технологии воздействия на биологические ткани

© | Буторина А.В.¹
| Архаров А.М.²

avbutorina@gmail.com

¹ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, 117997, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Достижения научно-технического прогресса стимулируют внедрение в медицину новых видов энергетических воздействий — лазерного излучения, низких и высоких температур. Определены теплофизические свойства биотканей, параметры и режимы воздействия, что позволило создать адекватные технические средства для успешной их реализации. Выбранные параметры воздействия, а также возможности их сочетания позволили дифференцированно подходить к выбору метода лечения. Эффективность криогенных технологий в лечении составляет 99 %, сочетания низких и высоких температур — 98 %. Применение лазерных технологий позволило с успехом лечить пигментные пятна кожных покровов, что ранее было невозможно. Технологии крио, СВЧ и лазерного воздействия на ткани организма человека позволили решить многие проблемы медицины с высоким социальным и экономическими эффектами.

Ключевые слова: криохирургия, СВЧ, лазерное воздействие

New Cryogenic, Microwave and Laser Technologies of Exposure on Biological Tissues

© | Butorina A.V.¹
| Arkharov A.M.²

avbutorina@gmail.com

¹ Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU), Moscow, 117997, Russia

² BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Achievements of scientific and technological progress stimulate the introduction into medicine of new types of energy effects — laser radiation, low and high temperatures. The thermophysical properties of biological tissues, the parameters and modes of exposure were determined, which made it possible to create adequate technical means for their successful implementation. The selected exposure parameters, as well as the possibilities of combining them, allowed a differentiated approach to the choice of treatment method. The effectiveness of cryogenic technologies in treatment is 99 %, the combination of low and high tem-

peratures — 98 %. The use of laser technology has made it possible to successfully treat pigment spots of the skin, which was previously impossible. The technologies of cryo, microwave, and laser exposure to the tissues of the human body have made it possible to solve many problems of medicine with high social and economic effects.

Keywords: cryosurgery, microwave, laser exposure

Инновационная неоновая рефрижераторная установка, работающая на температурном уровне до 30 К

© Далаков П.

Нойбер Е.

Клир Ю.

Герцог Р.

ralf.herzog@ilkdresden.de

Институт воздушной и холодильной техники GmbH, отдел криогенной техники и физики низких температур, Бертольт-Брехт-Аллее, 20, 01309 Дрезден, Германия

С появлением высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) появился интерес к использованию неона в качестве криогенного хладагента. Основным фактором, ограничивающим широкое использование неона в криогенной технике, была его высокая стоимость по сравнению с гелием. Однако в настоящее время цены на неон значительно снизились, поэтому не стоит пренебрегать его использованием в качестве хладагента. Современные высокотемпературные сверхпроводящие материалы могут работать при температурах до 100 К, что дает возможность использовать жидкий азот для их охлаждения. Однако при снижении рабочей температуры характеристики материалов и устройств ВТСП существенно улучшаются. Например, для некоторых задач необходимо, чтобы ВТСП обеспечивали плотность тока до 10^5 А/см² при магнитном поле до 10 Тл или даже выше. Эти параметры могут быть реализованы при охлаждении до температур ниже 50 К. Для таких температур можно использовать только гелий, неон и водород. Криостатирование может осуществляться с использованием холодильного цикла или жидкого теплоносителя. Основной проблемой при использовании гелия является его низкая плотность, что усложняет его сжатие и, следовательно, приводит к необходимости увеличения размеров каналов, по которым циркулирует охлаждающий гелий. Использование водорода ограничено его взрывоопасностью. Поэтому неон и неоново-гелиевая смесь являются наиболее вероятными хладагентами для использования в интервале температур 27...63 К. В настоящее время в ИЛК Dresden разрабатывается новая компактная, недорогая, экономически конкурентоспособная и не оказывающая негативного воздействия на окружающую среду криогенная система охлаждения, предназначенная для охлаждения непрерывного потока газа примерно до 30 К. Приведены термодинамические расчеты циклов на неоновых и неоново-гелиевых смесях. Дана оценка степени термодинамического совершенства неоновых циклов по сравнению с неоново-гелиевыми циклами. Использование неона и неоногелиевой смеси в криогенных циклах для криостатирования при температуре в интервале 27...63 К может повысить термодинамическую эффективность криогенной системы и снизить затраты энергии на получение холода на данном температурном уровне. В работе показана технологическая цепочка/процесс,

а также основные экономические показатели разрабатываемой системы. Наличие такой инновационной системы охлаждения может использоваться в широком спектре криогенных и рефрижераторных установок.

Ключевые слова: неон, холодильное оборудование, сверхпроводник

Innovative Neon Refrigeration Unit Operating Down to 30 K

© Dalakov P.
Neuber E.
Klier J.
Herzog R.

ralf.herzog@ilkdresden.de

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Hauptbereich Kryotechnik und Tieftemperaturphysik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Germany

The appearance of high-temperature superconductors (HTSC) has intensified interest in using neon as a cryogenic refrigerant. The main factor limiting the widespread use of neon in cryogenic technology was its high cost in comparison with helium. However, at the present time, the price of neon is relatively low, so should not be neglect as a refrigerant. Modern high-temperature superconducting materials can operate at temperatures up to 100 K, which makes it possible to use liquid nitrogen for their cooling. However, when the operating temperature is lowered, the characteristics of HTSC materials and devices are substantially improved. For example, for some applications, it is necessary that HTSC provide a current density of up to 10^5 A/cm² at a magnetic field of up to 10 T or even higher. These parameters can be realized with cooling to temperatures below 50 K. For such temperatures only helium, neon, and hydrogen can be used. Cryostatting can be carried out using a refrigerating cycle or a liquid coolant. The main problem with the use of helium is its low density, which complicates its compression and hence leads to the need to increase the dimensions of the channels through which cooling helium circulates. The use of hydrogen is limited by its explosive nature. Therefore neon and neon-helium mixture, are the most probable refrigerants for use in the temperature range 27...63 K. A new compact, low-cost, economically competitive and environmentally friendly cryogenic cooling system for cooling a continuous gas flow down to about 30 K is under developing at the ILK Dresden, reported in this paper. The paper shows thermodynamic calculations of cycles on neon and neon-helium mixtures. The assessment of the degree of thermodynamic perfection of the neon cycles in comparison of neon-helium cycles is provided. The use of neon and neon-helium mixture in cryogenic cycles for cryostatting at a temperature level of 27...63 K will increase the thermodynamic efficiency of the cryogenic system and reduce the energy costs of obtaining cold at this temperature level. A technological chain/process, as well as the main economic indicators of the system under development are presented. The availability of such an innovative refrigeration system can be used in a wide range of cryogenic and cooling applications.

Keywords: neon, refrigeration, superconductor

Получение сжиженного метана — горючего для ракетных двигателей

© | Домашенко А.М.
| Довбиш А.Л.

root@cryogenmash.ru

ПАО «Криогенмаш», Балашиха, Московская обл., 143900, Россия

Использование в ракетно-космической, авиационной и другой специальной технике новых компонентов топлив, речь идет о СПГ или сжиженном метане, является перспективным. На основе этих компонентов топлива возможно обеспечение ряда технико-тактических показателей летательных аппаратов, которые недостижимы при использовании традиционных топлив. Рассмотрены разработанные ПАО «Криогенмаш» криогенные системы ожижения природного газа с извлечением жидкого метана методом низкотемпературной конденсации и ступенчатой сепарации, а также ректификации. Первый метод обеспечивает уменьшение концентрации низкокипящих примесей (азот, кислород, водород, гелий). Второй метод позволяет снизить содержание в сжиженном метане не только низкокипящих, но и высококипящих жидкостей.

Ключевые слова: криогенная техника, сжиженный метан, ожижитель, ступенчатая сепарация, ректификация, ректификационная колонна

Production of Liquefied Methane Fuel for Rocket Engines

© | Domashenko A.M.
| Dovbish A.L.

root@cryogenmash.ru

PJSC "Cryogenmash", Balashikha, Moscow region, 143907, Russia

The using of new fuel components, it's about LNG or liquefied methane, is perspective in rocket-space, aviation and other special technique. Based on these fuel components, it is possible to provide a number of technical and tactical aircraft indicators, which are unachievable when using traditional fuels. Cryogenic natural gas liquefying systems with liquid methane extraction by low-temperature condensation and step separation also rectification methods developed by Cryogenmash PJSC, are considered. The first method provides a decrease of low-boiling additive (nitrogen, oxygen, hydrogen, helium) concentration. The second one allows reducing content of not only low-boiling but also high-boiling liquids in liquefied methane.

Keywords: cryogenic technique, liquefied methane, liquefier, step separation, rectification, rectification column

Современное состояние и тенденции развития мировой вакуумной техники

© | Нестеров С.Б.

niivt@niivt.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия
ВНИИВТ им. С.А. Векшинского, Москва, 117105, Россия

С 2006 по 2019 г. в Москве под эгидой Российского научно-технического вакуумного общества им академика С.А. Векшинского прошло 14 международных выставок вакуумного оборудования «ВакуумТехЭкспо». На протяжении последних 10 лет проводился конкурс на лучший инновационный продукт в области вакуумной техники и технологии. Призами конкурса отмечено 82 лучших продукта, что явилось основой для анализа основных тенденций развития мировой вакуумной техники.

Ключевые слова: вакуумная техника и технология, современное состояние, тенденции развития

Current state and Development Trends of the Global Vacuum Technology

© | Nesterov S.B.

niivt@niivt.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia
VNIIBT them. S.A. Vekshinsky, Moscow, 117105, Russia

14 international exhibitions of vacuum equipment “VacuumTechExpo” were held from 2006 to 2019 in Moscow under the auspices of the Russian Vekshinski Scientific and Technical Vacuum Society (RVSTVS). Over the past 10 years a competition was held for the best innovative product in the field of vacuum equipment and technologies. Prizes of the competition marked 82 best products, which was the basis for analysis of the main trends in the development of global vacuum technology.

Keywords: vacuum equipment and technology, modern state, development trends

Моделирование температурных полей на элементах стенда тепловакуумных испытаний космических аппаратов: мультифизический подход с использованием программных средств для моделирования оптических систем и теплофизического моделирования

© | Нестеров С.Б.^{1,2}

niivt@niivt.ru

| Савин А.В.²

| Смирнов П.Г.²

| Филатов А.А.²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² РНТВО им. академика С.А. Векшинского, Москва, 105005, Россия

Рассматривается мультифизический подход к моделированию тепловых потоков и температурных полей на объектах, входящих в состав стенда тепловакуумных испытаний космических аппаратов. Подход базируется на совместном использовании и импорте/экспорте данных между программным обеспечением для расчета и моделирования оптических систем (OpticStudio ZENAX (r), LightTools (r)) и программным обеспечением для теплофизических расчетов (ANSYS (r), Fluent (r)).

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, космические аппараты, моделирование оптических систем, моделирование температурных полей

Modeling of Temperature Fields on Elements of a Spacecraft Thermal Vacuum Test Bench: A Multiphysical Approach Using Software for Modeling Optical Systems and Thermophysical Modeling

© | Nesterov S.B.^{1,2}

niivt@niivt.ru

| Savin A.V.²

| Smirnov P.G.²

| Filatov A.A.²

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² RNTO them. academician S. A. Vekshinsky, Moscow, 105005, Russia

The article discusses the multiphysical approach to modeling heat fluxes and temperature fields at objects that are part of the spacecraft thermal vacuum test bench. The approach is based on the joint use and import / export of data between the software for calculating and modeling optical systems (OpticStudio ZENAX (r), LightTools (r)) and the software for thermophysical calculations (ANSYS (r), Fluent (r)).

Keywords: thermal vacuum tests, spacecraft, modeling optical systems, thermophysical modeling

Высокоэффективный роторный волновой криогенератор

© | Архаров А.М.¹
| Семенов В.Ю.¹
| Малахов С.Б.²
| Малахов А.С.¹

malahov.s@bk.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ООО «Лимонте-Нефтегазхимсервис», Москва, 119180, Россия

Показана возможность увеличения эффективности РВКГ путем частичного изменения режима работы; получены экспериментальные данные, подтверждающие увеличение изоэнтропного КПД. Достигнутые значения КПД заключены в диапазоне 0,7...0,8 при степени расширения 2,5...1,5. Определен механизм повышения эффективности данного устройства. Полученные результаты подтверждены решением уравнений волнового процесса переноса энергии методом акад. Годунова.

Ключевые слова: установки сжижения природного газа, детандер-компрессор, расширительное устройство, изоэнтропный КПД

High Efficiency Rotary Wave Cryogenerator (RWCG)

© | Arkharov A.M.¹
| Semenov V.Yu.¹
| Malakhov S.B.²
| Malakhov A.S.¹

malahov.s@bk.ru

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² LLC "Limonte-Neftegazkhimservis", Moscow, 119180, Russia

Shown the possibility of increasing the effectiveness of the RWCG by partially changing the operating mode; experimental data were obtained confirming an increase in isentropic efficiency. The achieved efficiency values are in the range of 0.7–0.8 with a degree of expansion of 2.5–1.5. Found a mechanism to improve the efficiency of this device. The results obtained are confirmed by solving the equations of the wave process of energy transfer by the method of Academician Godunov.

Keywords: natural gas liquefaction installations, expander-compressor, expansion device, isentropic efficiency

Перспективные области применения криогенных технологий в современной промышленности

© | Аллин М.Н.¹
| Перез А.²

allin@demaco.su

¹ООО «Демако Криогеникс Руссия» (Demaco Cryogenics Russia), Москва, 109316, Россия

²Demaco Holland B.V., PO Box 4, NL-1723 ZG, Noord-Scharwoude, Netherlands

Криогенные технологии находятся на переднем крае разработок новейших промышленных установок, например: сверхпроводящие двигатели, позволяющие достичь общей эффективности 99 %; системы криостатирования магнитов, удерживающих плазму термоядерных реакторов, позволяющих получить практически неисчерпаемые источники энергии; системы сжижения, транспортировки, хранения и выдачи сжиженного природного газа, которые стали занимать значительную долю энергетического рынка; сверхпроводящие системы высоковольтных систем, позволяющие глобальным образом снизить затраты. В докладе описаны передовые разработки компании Демако в вышеупомянутых областях.

Ключевые слова: сверхпроводящий двигатель, СПГ терминал, криосистема, сжиженный природный газ

Prospective Applications of Cryogenic Technologies in State-of-the-Art Industry

© | Allin M.N.¹
| Perez A.²

allin@demaco.su

¹Demaco Cryogenics Russia, Moscow, 109316, Russia

²Demaco Holland B.V., PO Box 4, NL-1723 ZG, Noord-Scharwoude, Netherlands

Cryogenic technologies are at the forefront of the development of the state-of-the-art industrial plants, for example: superconducting motors to achieve a total efficiency of 99%; cryosystems of magnets for treating plasma of thermonuclear reactors allowing to receive practically inexhaustible sources of energy; liquefied natural gas liquefaction, transportation, storage and delivery systems, which began to occupy a significant share of the energy market; superconducting systems of high-voltage systems, allowing global reduction of cost. The report describes the advanced developments of Demaco in the above mentioned industrial fields.

Keywords: superconducting motor, LNG terminal, cryosystem, liquefied natural gas

Система криогенного обеспечения ВТСП-кабеля длиной 2500 м

© | Стрельников А.В.
Паркин А.Н.
Попов О.М.
Удут В.Н.

info@geliymash.ru

ОАО «НПО «Гелиймаш»», Москва, 115280, Россия

Представлены результаты разработки системы криогенного обеспечения (СКО), предназначенной для охлаждения и термической стабилизации в сверхпроводящем состоянии промышленного ВТСП кабеля длиной 2500 м в диапазоне температур 65...75 К. Дано краткое техническое описание СКО ВТСП кабеля и входящего в нее оборудования. Приводятся основные технические характеристики и принципиальная схема СКО. Приводятся результаты испытаний СКО.

Ключевые слова: азот, высокотемпературный сверхпроводник, криостабилизация

Cryogenic Supply System of HTS Cable of 2500 m Length

© | Strelnikov A.V.
Parkin A.N.
Popov O.M.
Udut V.N.

info@geliymash.ru

JSC «NPO «Geliymash»», Moscow, 115280, Russia

The report presents the results of the development of a cryogenic support system (CSS) designed for cooling and thermal stabilization in the superconducting state of industrial HTSC cable length of 2500 m in the temperature range 65...75 K. A brief technical description of the HTSC cable and its equipment is given. The main technical characteristics and schematic diagram of the CSS are given. The results of the cryogenic supply system tests are presented.

Keywords: nitrogen, high-temperature superconductor, cryostabilization

Использование криогенных компонентов топлив для жидкостных ракетных двигателей и в системах жизнеобеспечения аппаратов пилотируемой космонавтики

© | Орлин С.А.

chpvos@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В приведенных материалах показано использование кислорода, водорода, сжиженных природных газов (метан) и фтора в качестве компонентов топлива жидкостных

ракетных двигателей (ЖРД). Указаны причины, вызвавшие необходимость применения кислорода в качестве окислителя. Раскрыты преимущества и недостатки с точки зрения использования перечисленных компонентов в качестве элементов топлива ЖРД. Рассмотрены вопросы экологии при употреблении рассматриваемых топлив. Показано не только использование криогенных компонентов как топлива для ЖРД, но и в системах жизнеобеспечения в пилотируемых аппаратах при космических исследованиях.

Ключевые слова: кислород, водород, фтор, жидкостные ракетные двигатели, системы жизнеобеспечения, экология

The use of cryogenic fuel components for rocket engines and in life support systems of space vehicles

© | Orlin S.A.

chpvos@yandex.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The use of oxygen, hydrogen, liquefied natural gases (methane) and fluorine as components of liquid propellant rocket engines (LRE) is shown. The reasons that necessitate the use of oxygen as an oxidizing agent are indicated. The advantages and disadvantages from the point of view of using these components as fuel elements for rocket engines are disclosed. Ecological questions are considered when using the considered fuels. It is shown not only the use of cryogenic components as fuel for LRE, but also in life support systems in manned vehicles in space research.

Keywords: oxygen, hydrogen, fluorine, LRE, life support systems, ecology

Автоматизированная система управления параметрами хладоносителя в ректификационной установке

© | Бондаренко В.Л.

Куприянов М.Ю.

Аксенова М.М.

aksenovamm@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Внедрение автоматических систем управления в технологические процессы является актуальной задачей. Для поддержания параметров хладоносителя в ректификационной установке предлагается автоматизированная система контроля и управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) отечественного производства с программным обеспечением, разработанным в свободно распространяемой среде CoDeSys. В статье рассматривается возможность использования запорно-регулирующей арматуры с электроприводом и с шаговым двигателем для регулировки расхода хладоносителя и поддержания давления в конденсаторе ректификационной колонны. Внедренная система управления позволяет сократить потребление хла-

доносителя в процессе работы ректификационной установки, поддержать основные технологические параметры, что способствует получению газов высокой чистоты.

Ключевые слова: запорно-регулирующий клапан, программируемый логический контроллер (ПЛК), CoDeSys, пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор, шаговый двигатель

Automated Control System of Rectification Unit Refrigerant Parameters

© | Bondarenko V.L.
Kupriyanov M.Yu.
Aksenova M.M.

aksenovamm@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The advent of automatic control systems in technological processes is a relevant task. An automated control and operating system is developed to maintain the rectification unit refrigerant parameters. Automated system is based on programmable logic controllers (PLC) of Russian production with software developed in the freely distributed CoDeSys. The article considers the possibility of using shut-off-and-regulating and control valves with electric drive and stepper motor to adjust the coolant flow and maintain pressure in the rectification column condenser. The implemented control system allows to reduce the consumption of refrigerant in the operation process, to maintain the main technological parameters, which contributes to obtain the high purity gases.

Keywords: shut-off control valve, programmable logic controllers (PLC), CoDeSys, proportional-integral-derivative (PID) controller, stepper motor

Примесь воды в продуктах газоразделения высокой чистоты

© | Куприянов М.Ю.
Устюгова Т.Г.

tanyaystygova@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследования процессов накопления и удаления примеси воды в криогенных установках получения инертных газов чистотой более 99,999 %. Проведены расчеты температуры точки росы для газов при различных давлениях, и определены основные источники увеличения концентрации водяных паров в продукционных потоках криогенных установок разделения. Даны рекомендации по технологии очистки газовой смеси, поступающей в криогенный блок разделения, и заполнению баллонов продукционным газом, которые позволяют снизить концентрацию водяных паров до уровня PPBV.

Ключевые слова: криогенный блок разделения; инертный газ, высокая чистота, точка росы, примесь, вода

Moisture Contamination in High Purity Gas Separation Products

© | Kupriyanov M.Yu.
| Ustiugova T.G.

tanyaystygova@mail.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Research results of water impurity accumulation and removal processes in cryogenic separation units for high-purity inert gas production (purity more than 99,999 %) were presented in the article. Dew point temperature calculations for gases at various pressures were done. Moisture contamination main sources in the product gaseous flows of cryogenic separation units were determined. Both recommendations regarding to the pre-purification technology for cryogenic separation unit feed gas and the cylinder filling process were provided. This guideline enables to reduce water vapor concentration in gas to the level of PPBV.

Keywords: cryogenic separation unit; inert gas, high purity, dew point, impurity, water

Сравнение рефрижераторных циклов при температуре криостатирования $T = 28...30$ К

© | Куприянов М.Ю.
| Сирота К.К.
| Куцко А.Г.

a.g.kutsko@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены рефрижераторные циклы, поддерживающие температуру криостатирования в диапазоне 28...30 К. Такой диапазон температур позволяет исследовать рабочие параметры цикла на таких криоагентах как He, H₂, D₂, Ne и Ne-He смесь. Применена технология исследования основанная на построении и анализе циклов с помощью моделирования в программном комплексе Aspen Hysys.

Ключевые слова: водород, дейтерий, гелий, неон, неон-гелиевая смесь, детандер, рефрижераторный цикл, компрессор

Comparison of Refrigeration Cycles at $T = 28...30$ K

© | Kupriyanov M.Yu.
| Sirota K.K.
| Kutsko A.G.

a.g.kutsko@mail.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The article discusses refrigeration cycles that maintain the cryogenic temperature range 28...30 K. This temperature range allows you to study the operating parameters of the cycle at different cryogenic agents such as He, H₂, D₂, Ne и Neium. The research technology

based on the construction and analysis of cycles using modeling in the Aspen Hysys software package has been applied.

Keywords: hydrogen, deuterium, helium, neon, nelium, expander, refrigeration cycle, compressor

Исследование извлечения ксенона из потоков ВРУ методом низкотемпературной адсорбции

© | Верховный А.И.¹ | verkhovnyyartem@gmail.com
| Воротынцев В.Б.²
| Куприянов М.Ю.¹
| Устюгова Т.Г.¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ПАО «Криогенмаш», Балашиха, Московская обл., 143900, Россия

Рассмотрен метод получения ксенона из газовых концентратов с применением адсорберов периодического действия. Разработан экспериментальный стенд для исследования динамики адсорбции ксенона при криогенных температурах. Проведено моделирование процесса адсорбции ксенона из так называемых «потоков безопасности» ВРУ на различных типах сорбентов: четырех сортов силикагеля КСМГ и оксиде алюминия. Исходя из требований взрыво- и пожаробезопасности, а также сокращения времени проведения эксперимента, в качестве модельной выбрана криптон-азот-гелиевая (Kr-N₂-He) смесь. Разработана методика проведения эксперимента, и по полученным данным выбран сорбент, обладающий максимальной динамической емкостью.

Ключевые слова: «поток безопасности» из ВРУ, низкотемпературная адсорбция, силикагели, адсорбция ксенона, адсорбер периодического действия

Xenon Extraction Investigation from ASU Streams by Low-Temperature Adsorption

© | Verkhovny A.I.¹ | verkhovnyyartem@gmail.com
| Vorotyntsev V.B.²
| Kupriyanov M.Yu.¹
| Ustiugova T.G.¹

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² PJSC “Cryogenmash”, Balashikha, Moscow region, 143907, Russia

Xenon extraction method from gas concentrates based on batch adsorption separation was considered in an article. An experimental unit for xenon adsorption dynamics studying at cryogenic temperatures was developed. Simulations were performed to investigate the process of xenon adsorption from ASU “safety stream” on different sorbent materials (four types of silica gel and active aluminum oxide). The krypton-nitrogen-helium (Kr-N₂-He) mixture was chosen as a modelling one to fulfil the requirements of fire and explosion safe-

ty and reduction of experiment duration. Specific experimental technique has been developed. Analyzing obtained experimental data, we have selected the sorbent with the maximum dynamic capacity for our application.

Keywords: ASU “safety stream”; low-temperature adsorption, xenon, silica gel, adsorber

Анализ разделения изотопов аргона методом низкотемпературной адсорбции

© | Бондаренко В.Л.
Куприянов М.Ю.
Верховный А.И.

verkhovnyyartem@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Получены оценочные расчетные значения критических параметров изотопов аргона ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar и соответствующие им значения констант уравнения состояния Ван-дер-Вальса, Редлиха – Квонга и Пенга – Робинсона. Полученные данные позволяют выполнить расчет изотерм адсорбции изотопов аргона на микропористых адсорбентах. Методика, предложенная для получения аналитических выражений изотерм адсорбции изотопов аргона при криогенных температурах, позволяет выполнить оценку степени влияния давления смеси изотопов и ее состава на величину коэффициента разделения смеси.

Ключевые слова: низкотемпературная адсорбция, изотермы адсорбции, адсорбция изотопов, инертные газы, аргон

Argon isotopes Separation Analysis by Low-Temperature Adsorption Method

© | Bondarenko V.L.
Kupriyanov M.Yu.
Verkhovny A.I.

verkhovnyyartem@gmail.com

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The argon isotopes ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar critical parameters estimated values were calculated and corresponding values of constants for Van-der-Walls, Redlich-Kwong and Peng-Robinson equations of state were obtained in this article. This data allowed to carry out the adsorption isotherms calculations on the microporous adsorbents. Method to obtain analytical expressions for argon isotopes adsorption isotherm at cryogenic temperatures was proposed. This approached allows estimating the isotope mixture pressure and composition influences on the mixture separation coefficient value.

Keywords: low-temperature adsorption, adsorption isotherm, isotopes adsorption, inert gas, argon

Экспериментальное исследование процесса терморегуляции при низкотемпературной циркуляционной заправке адсорбционной системы аккумуляирования природного газа

© | Чугаев С.С.
| Стриженов Е.М.
| Атаманов Г.Б.
| Кравченко И.Н.

chugaev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Адсорбционные системы аккумуляирования природного газа являются актуальной альтернативой традиционным системам компримированного и сжиженного природного газа. Низкотемпературная заправка систем адсорбированного природного газа (АПГ) обеспечивает повышенную емкость аккумуляирования, а также пожаро- и взрывобезопасность за счет снижения давления и увеличения доли «связанного» газа. Высокая эффективность терморегуляции адсорбционного слоя достигается применением циркуляционной заправки. В работе представлена принципиальная схема экспериментального стенда для исследования низкотемпературной циркуляционной заправки адсорбционного аккумуляатора АПГ объемом 51 л. Проведены экспериментальные исследования терморегуляции при низкотемпературной циркуляционной заправке в широких интервалах давлений (от 0,5 до 3,5 МПа) и объемных расходов (от 8 до 18 м³/ч), установлены соответствующие эмпирические закономерности.

Ключевые слова: адсорбция, адсорбент, адсорбированный природный газ, низкотемпературная заправка, циркуляционная заправка, терморегуляция

Experimental Research of the Thermal Management Process During Low-Temperature Circulating Charging of an Adsorbed Natural Gas Storage System

© | Chugaev S.S.
| Strizhenov E.M.
| Atamanov G.B.
| Kravchenko I.N.

chugaev@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Adsorbed natural gas storage systems are a relevant alternative to traditional compressed and liquefied natural gas systems. Low-temperature charging of adsorbed natural gas (ANG) storage systems provides increased storage capacity as well as fire and explosion safety by reducing pressure and increasing the proportion of «bound» gas. The high efficiency of the adsorption layer thermal management is achieved by the use of circulating charging. The work presents a schematic diagram of the experimental stand for the research of low-temperature circulating charging of a 51 liter adsorbed natural gas storage system. Experimental research of thermal management at low-temperature circulating charging in

wide ranges of pressures (from 0.5 to 3.5 MPa) and volumetric flow rates (from 8 to 18 m³/h) were carried out. The corresponding empirical laws were established.

Keywords: adsorption, adsorbent, adsorbed natural gas, low-temperature charging, circulating charging, thermal management

Выбор оптимального цикла ожижения воздуха для установки аккумулирования электроэнергии

© Шмелёва Е.А.
Архаров И.А.

liza_shmel@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проводится анализ и выбор цикла ожижения воздуха для установки аккумулирования электроэнергии на основе жидкого воздуха. Рассчитаны удельный коэффициент ожижения и коэффициент термодинамического совершенства для следующих циклов: цикл Линде – Хемпсона, цикл Клода, цикл Гейландта, цикл Коллинза, цикл с двумя детандерами. Проведен эксергетический расчет цикла Клода.

Ключевые слова: криогенный аккумулятор энергии, цикл ожижение воздуха, эксергетический анализ

Selection of the Optimum Air Liquefaction Cycle for Liquid Air Energy Storage

© Shmelyova E.A.
Arkharov I.A.

liza_shmel@mail.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The report analyzes and selects the liquefaction cycle for Liquid Air Energy Storage. The specific liquefaction coefficient and the coefficient of thermodynamic perfection were calculated for the following cycles: the Linde-Hampson cycle, the Claude cycle, the Haylandt cycle, the Collins cycle and the cycle with two expanders. The criteria for optimizing cycles is the maximum value of the liquefaction coefficient. The Claude cycle was chosen as the optimal cycle for use in the Liquid Air Energy Storage. Its exergy efficiency was calculated.

Keywords: liquid air energy storage, air liquefaction cycle, exergy analysis

Устройство повышения эффективности насадочной теплообменной колонны и способ его изготовления

© | Козлов А.В.
Игнатъев В.Г.
Желтоухов И.В.
Овчаров В.Г.
Скрипкин В.В.
Попов А.Н.

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394064, Россия

Приведена разработанная конструкция устройства теплообменной колонны с контактными элементами из косорифленных листов, позволяющая нивелировать недостатки использования структурных насадок. Представлены результаты исследования способа изготовления устройства из полимерных материалов.

Ключевые слова: ректификация, теплообменная колонна, распределительные устройства, полимеры

Device for Increasing the Efficiency of the Packed Heat and Mass Transfer Column and Manufacturing Method

© | Kozlov A.V.
Ignatiev V.G.
Zheltoukhov I.V.
Ovcharov V.G.
Skripkin V.V.
Popov A.N.

Military Educational and Scientific Center of Air Forces "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, 394064, Russia

The article presents the developed design of the heat and mass transfer column device with contact elements made of skewed sheets, which makes it possible to mitigate the disadvantages of using structural nozzles. The results of the study of the method of manufacturing the device from polymeric materials are presented.

Keywords: rectification, heat and mass transfer column, distribution devices, polymers

Математическое моделирование нестационарного процесса теплообмена в криогенных витых теплообменниках

© | Воробьев А.А.
| Посанчуков Д.П.
| Козлов А.В.
| Иванов А.В.

vaiu@mil.ru

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394064, Россия

Рассмотрена динамическая модель витого теплообменника и ее реализация в системе компьютерного моделирования MathWorks Simulink™. В качестве объекта моделирования выбран витой теплообменник с оребренными проволокой трубами серийно выпускаемого образца воздуходелительной установки малой производительности. Описана методика получения экспериментальных данных, проведено моделирование нестационарного процесса теплообмена и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: теплопередача, математическая модель, витой теплообменник, воздуходелительная установка

Mathematical Modeling of the Unsteady Heat Transfer Process in Cryogenic Heat Exchangers

© | Vorobev A.A.
| Posanchukov D.P.
| Kozlov A.V.
| Ivanov A.V.

vaiu@mil.ru

Military Educational and Scientific Center of Air Forces "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, 394064, Russia

The paper considers a coil-wound heat exchanger dynamic model and its implementation in the MathWorks Simulink™ computer simulation system. A coil-wound heat exchanger with wire wound finned tubes of a off-the-shelf sample of a low-capacity air separation plant was chosen as the object of simulation. The methodology for obtaining experimental data is described, the unsteady heat transfer process is modeled, and the results obtained are analyzed.

Keywords: heat transfer, mathematical modeling, coil-wound heat exchanger, air separation plant

Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование изменения изотопного состава кислорода при различных способах его извлечения из воздуха

© | Билалов М.А.
| Казакова А.А.
| Никифоров Ю.В.

bilalov-m2006@yandex.ru
kazakova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В процессе извлечения кислорода из воздуха из-за различия свойств изотопов или их соединений, количество тех или иных изотопов кислорода может изменяться по сравнению с их содержанием в атмосферном воздухе. Пока в целом не определён изотопный состав кислорода при различных способах разделения воздуха. Для разделения воздуха методом низкотемпературной ректификации известны некоторые данные по изотопному составу кислорода, то для способов короткоциклового адсорбции и мембранного способа разделения воздуха такие данные отсутствуют. Вполне возможно, что изотопный состав кислорода будет зависеть от способа его получения. В связи с этим исследование изотопного состава кислорода для различных способов разделения и сравнения полученных результатов для выявления метода разделения, при котором возможно получение максимальных концентраций тяжелых изотопов кислорода, являются актуальной задачей. В работы приведено описание основных компонентов атмосферного воздуха и значения их концентраций, изотопного состава кислорода атмосферы, рассмотрены основные методы разделения воздуха. Описаны основные методы получения изотопов, приведены данные по количественному составу изотопов кислорода. Представлено описание экспериментальной установки для измерения изотопов кислорода на основе масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой и описан принцип её работы. Приведена методика оценки погрешности результатов измерений.

Ключевые слова: кислород, изотопы кислорода, тяжелая вода, ректификация, короткоциклового адсорбция, мембранный способ разделения воздуха

Experimental and Theoretical Research of Changes of the Isotopic Composition of Oxygen Produced with Various Methods of Air Separation

© | Bilalov M.A.
| Kazakova A.A.
| Nikiforov Yu.V.

bilalov-m2006@yandex.ru
kazakova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

In the process of extracting oxygen from air the amount of oxygen isotopes can vary compared to their content in atmospheric air due to differences in the properties of isotopes or their compounds. So far, in general, the isotopic composition of oxygen has not been determined for various methods of air separation. Some data on the oxygen isotopic composi-

tion for the cryogenic distillation method of air separation are known, but there isn't such data for the pressure swing adsorption and the membrane air separation methods. It is possible that the isotopic composition of oxygen will depend on the method of its production. In this regard, the research of the oxygen isotopic composition for various methods of separation and comparison of the results obtained to identify the separation method, in which it is possible to obtain maximum concentrations of heavy oxygen isotopes, are an urgent tasks. The paper describes the main components of atmospheric air and the values of their concentrations, the isotopic composition of atmospheric oxygen, and the main air separation methods are considered. The main methods for producing isotopes are described, data on the quantitative composition of oxygen isotopes are given. A description of an experimental apparatus for measuring oxygen isotopes based on a inductively coupled plasma mass spectrometer is given and its operation principle is described. The methodology for estimating the error of measurement results is given.

Keywords: oxygen, oxygen isotopes, heavy water, distillation, pressure swing adsorption, membrane gas separation

Математическое моделирование нестационарных режимов работы гелиевого ожижителя

© | Лавров Н.А.¹
| Буткевич И.К.²
| Хуциева С.И.¹

lavrovna@bmstu.ru
butkevich@kapitza.ras.ru
khutsieva.sofia2012@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва, 119334, Россия

Созданы динамические модели двухпоточного теплообменного аппарата и сборника жидкого гелия. Данные модели необходимы для моделирования нестационарных режимов работы ожижителя гелия. Гелиевый ожижитель состоит из витых теплообменных аппаратов, турбодетандеров, компрессора, сборника и регулирующих вентилях. При создании модели для теплообменного аппарата использовались законы сохранения энергии для потоков, теплопередающей стенки, сердечника и корпуса теплообменного аппарата, и закон сохранения энергии и массы для сборника жидкого гелия. При решении использовался численный метод - метод конечных разностей с применением явной конечно - разностной схемы. Получившаяся система уравнений относительно значений неизвестных в точках разбиения по координате и времени решалась с помощью компьютерной программы Matlab Simulink. Полученные результаты адекватно описывают нестационарные процессы, проходящие в теплообменном аппарате и в сборнике жидкого гелия. Созданные динамические модели теплообменного аппарата и сборника жидкого гелия можно использовать для создания динамической модели всей установки по ожижению гелия. Полная динамическая модель установки может быть использована для создания математического обеспечения системы автоматического управления криогенными гелиевыми установками.

Ключевые слова: гелиевый ожижитель, математическое моделирование, динамические режимы, метод конечных разностей

Mathematical Modeling of Non-Stationary Modes of Operation of the Helium Liquefier

© | Lavrov N.A.¹
Butkevitch I.K.²
Khutsieva S.I.¹

lavrovna@bmstu.ru
butkevich@kapitza.ras.ru
khutsieva.sofia2012@yandex.ru

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² P.L. Kapitza Institute for Physical Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334, Russia

Dynamic models of a dual-flow heat exchanger and a separator of liquid helium have been created. These models are necessary for modeling non-stationary operating conditions of a helium liquefier. The helium liquefier consists of coil-wound heat exchangers, turbo expanders, a compressor, a separator and control valves. For creation a model for a heat exchanger, the laws of energy conservation for flows, the heat transfer wall, core and shell of the heat exchanger, and the law of conservation of energy and mass for a separator of liquid helium were used. For solving, a numerical method was used - the finite difference method using an explicit finite-difference scheme. The resulting system of equations for the values of unknowns at the breakdown points in coordinate and time was solved using the computer program Matlab Simulink. The results obtained adequately describe non-stationary processes taking place in a heat exchanger and in a helium separator. The created dynamic models of a heat exchanger and a separator of liquid helium can be used to create a dynamic model of the entire helium liquefier. A complete dynamic model of the installation can be used to create mathematical support for the automatic control system of cryogenic helium plants.

Keywords: helium liquefier, mathematical modeling, dynamic modes, finite difference method

Кварцевый сенсор для измерения криогенных температур

© | Гошля Р.Ю.
Третьяков А.В.

goshliay_roman@mail.ru

Омский государственный технический университет, Омск, 644050, Россия

Рассматривается возможность применения кварцевых чувствительных элементов для создания, сенсоров измерения криогенных температур т.к. основными критериями развития криогенной термометрии являются: повышение чувствительности и стабильности метрологических характеристик сенсоров, уменьшением конструктивных параметров и расширением эксплуатационных характеристик сенсоров, т.к. они являются основными элементами электронных блоков стабилизации температур. Сенсоры температуры на основе пьезоэлектрического кварца по своим характеристикам и параметрам сопоставимы с сенсорами, применяемыми для измерения криогенных температур (термометры сопротивления и др.), и обладает следующими достоинствами: 1) простота обработки выходного сигнала; 2) высокая временная стабильность параметров во времени, вызванная свойствами применяемого материала чувствительного элемента; 3) независимость показаний от внешних электромагнитных и

механических воздействий; 4) высокая разрешающая способность; 5) возможность передачи информационного сигнала на большие расстояния.

Ключевые слова: кварц, криогенные температуры, частотный выходной сигнал, датчик температуры, криогенный кварцевый термометр

Quartz Sensor for Measuring Cryogenic Temperatures

© | Goshlay R.Yu.
Tretyakov A.V.

goshliay_roman@mail.ru

Omsk state technical University, Omsk, 644050, Russia

In this paper, we consider the possibility of using quartz sensing elements for the creation of sensors for measuring cryogenic temperatures, as the main criteria for the development of cryogenic thermometry are: increasing the sensitivity and stability of metrological characteristics of sensors, reducing the design parameters and expanding the operational characteristics of sensors, as they are the main elements of electronic temperature stabilization units. Temperature sensors based on piezoelectric quartz in their characteristics and parameters are comparable to sensors used to measure cryogenic temperatures (resistance thermometers, etc.), and has the following advantages: 1) easy to process the output signal; 2) high temporal stability of parameters in time caused by the properties of the sensor material used; 3) independence of indications from external electromagnetic and mechanical influences; 4) high resolution\$ 5) ability to transmit information signal over long distances.

Keywords: quartz, cryogenic temperatures, frequency output signal, temperature sensor, cryogenic quartz thermometer

Оценка термодинамической эффективности энергосберегающей системы воздухоразделительной установки на основе энтропийно-статистического анализа

© | Галимова Л.В.
Седойкин И.Е.

galimova_lv@mail.ru
klei-pva@mail.ru

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, 414056, Россия

Создана автоматизированная система энтропийно-статистического анализа позволяющая определить удельные работы сжатия, необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии, степень термодинамического совершенства процесса для любого типа воздухоразделительных установок (ВРУ) и энергосберегающей системы ВРУ с абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной (АБХМ) при различных сочетаниях режимных параметров.

Ключевые слова: энтропийно-статистический анализ; воздухоразделительная установка, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, энергоэффективность

Evaluation of Thermodynamic Efficiency of Energy-Saving System of Air Separation Plant on the Basis of Entropy-Statistical Analysis

© Galimova L.V.
Sedoykin I.E.

galimova_lv@mail.ru
klei-pva@mail.ru

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russia

An automated system of entropy-statistical analysis was created to determine the specific compression work, the required specific energy costs to compensate for the production of entropy, the degree of thermodynamic perfection of the process for any type of air separation plants (ASP) and energy-saving ASP system with absorption bromide refrigeration machine (ABRM) at different combinations of operating parameters.

Keywords: entropy-statistical analysis; air separation unit, absorption bromide refrigeration machine, energy efficiency