

Секция 1.1. Криогенная техника

Очистка ксенона от низкокипящих примесей методом ректификации

© | Бондаренко В.Л.¹
| Быканов А.Н.²
| Симоненко Ю.М.³

vbondarenko@raregases.org

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

² "KLA-Tencor Corporation", Милпитас, 95035, США

³ Одесская национальная академия пищевых технологий,
Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
имени В.С. Мартыновского, Одесса, 65039, Украина

В процессе извлечения ксенона из кислородного концентрата и в результате его использования в медицинской практике, электронной промышленности и других отраслях образуются смеси, в которых преобладают низкокипящие компоненты. Критические температуры таких примесей на десятки градусов ниже, чем тройная точка ксенона. Поскольку побочные низкокипящие компоненты и ксенон не способны одновременно сосуществовать в виде системы пар – жидкость, разделение подобных смесей методом дистилляции затруднено. Рассмотрены технические решения, направленные на предотвращение замерзания целевого продукта — ксенона в контактном пространстве ректификационной колонны и в конденсаторе, охлаждаемом жидким азотом. Предложено искусственно вводить в контактное пространство колонны промежуточный компонент, например, криптон. За счет этого удается разделить слои ксенона и низкокипящего компонента, например, N₂. Прослойка промежуточного вещества автоматически удерживается на определенном удалении от конденсатора путем изменения расхода отдувочного потока. Создана компактная установка, которая обеспечивает чистоту ксенона 99,999 %. Новая техника обеспечивает вторичное использование ксенона и способствует новых сфер применения этого уникального продукта.

Ключевые слова: рециркуляция ксенона, ректификация, промежуточный компонент

Purification of Xenon from Low-Boiling Impurities by Rectification Method

© | Bondarenko V.L.¹

vbondarenko@raregases.org

| Bykanov A.N.²

| Symonenko Yu.M.³

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² KLA–Tencor Corporation”, Milpitas CA, 95035, USA

³ Institute of Refrigeration Cryotechnology and Ecoenergetics n.a. V.S. Martynovsky, Odessa, 65039, Ukraine

In the process of extracting xenon from oxygen concentrate as a result of its use in medical practice, the electronics industry and other industries, mixtures are formed in which low-boiling components predominate. The critical temperatures of such impurities are tens of degrees lower than the triple point of xenon. Since secondary low-boiling components and xenon are not able to coexist simultaneously in the form of a system of pairs - liquid, separation of such mixtures by distillation is difficult. Technical solutions aimed at preventing freezing of the target product — xenon in the contact space of a rectification column and in a condenser cooled by liquid nitrogen are considered. It is proposed to artificially introduce an intermediate component, for example, krypton, into the contact space of the column. Due to this, it is possible to separate the layers of xenon and low-boiling component, for example, N₂. The intermediate layer is automatically held at a certain distance from the condenser by changing the flow rate of the upper stream. A compact installation has been created that provides 99.999 % xenon purity. The new technology provides xenon recycling and promotes new applications for this unique product.

Keywords: recycle xenon, rectification, intermediate component

Кoeffициент извлечения неона в технологии его производства из атмосферного воздуха

© | Бондаренко В.Л.¹

vbondarenko@raregases.org

| Лосьяков И.А.²

ilosyakov@cryoin.com

| Дьяченко О.В.²

diachenko.cryoin@gmail.com

| Дьяченко Т.В.³

diachenko.tetiana.v@gmail.com

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

² ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

³ Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 65082, Украина

Технология производства неона высокой чистоты включает несколько этапов, реализуемых в отдельных установках. Актуальной задачей является оценка качества работы каждой установки с целью совершенствования наименее эффективного этапа технологии. Для оценки качества работы отдельных установок приняты коэффициент извлечения и удельное энергопотребление. Расчётными методами было выявлено, что ступень первичного обогащения неонгелиевой смеси в воздухоразделительных

установках характеризуется самым низким значением коэффициента извлечения. Повторное обогащение неона производится в дефлегматорах на азотном уровне температур. Снижение рабочей температуры ниже уровня 78 К значительно увеличивает удельные энергозатраты на обогащение, практически не влияя на коэффициент извлечения. В ректификационной установке для производства неона коэффициент его извлечения определяется содержанием гелия в отдувках указанной установки. Утилизация неона из концентрата гелия производится адсорбционным методом. Исследования показали, что коэффициент извлечения и удельные затраты энергии на производство гелия зависят от температурного уровня охлаждения.

Ключевые слова: неонгелиевая смесь, обогащение, дефлегматор, разделение, неон, гелий, удельные энергозатраты, коэффициент извлечения.

Neon Extraction Coefficient in the Technology of its Production from Ambient Air

© | Bondarenko V.L.¹

| Losyakov I.A.²

| Diachenko O.V.²

| Diachenko T.V.³

vbondarenko@raregases.org

ilosyakov@cryoin.com

diachenko.cryoin@gmail.com

diachenko.tetiana.v@gmail.com

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² "Cryoin Engineering Ltd.", Odessa, 65026, Ukraine

³ Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 65082, Ukraine

The technology of high-purity neon production includes several stages that are implemented in separate devices. It is essential to assess the operational quality of each device in order to find and improve the least effective technology stage. The extraction factor and specific energy consumption have been adopted to assess the operational quality of individual devices. The calculation methods have shown that the stage of primary enrichment of neon-helium mixture in air separation units is characterized by the lowest extraction coefficient. The re-enrichment of neon is carried out in reflux condensers at the nitrogen temperature level. Reducing the operating temperature below 78 K significantly increases the specific energy consumption for the enrichment, practically without improving the recovery rate. In a rectification unit for the production of neon, the extraction coefficient is determined by the helium concentration in the waste flow of a specified plant. Neon is recovered from a helium concentrated mixture by an adsorption method. The studies have shown that the extraction factor and specific energy consumption for the helium production depend on the temperature level of cooling.

Keywords: neon-helium mixture, enrichment, reflux condenser, separation, neon, helium, specific energy consumption, extraction coefficient

Криогенные гелиевые установки ОАО «НПО «Гелиймаш»» для системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA

© | Андрушин А.И.
| Васильев М.Ю.
| Краковский Б.Д.
| Попов О.М.
| Фокеев Ф.Ф.

info@geliymash.ru

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

В докладе представлены результаты разработки современных автоматизированных криогенных гелиевых установок для системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, г. Дубна. Дано краткое техническое описание ожижителя гелия ОГ-1000 и спутникового гелиевого рефрижератора РСГ-2000/4,5. Приводятся основные технические характеристики и принципиальные схемы установок. Рассматриваются особенности конструкции, представлено описание технологического процесса в различных режимах работы. Перечислены требования к автоматизированным системам управления, указаны их основные функции и обозначены границы автоматизации. В результате проведенной работы в ОАО «НПО «Гелиймаш»» спроектировано и изготовлено оборудование для обеспечения жидким гелием электромагнитной системы строящегося комплекса ускорителей.

Ключевые слова: гелий, ожижитель, рефрижератор

Cryogenic Helium Installations of ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ»» for the Cryogenic Support System of the NICA Accelerator Complex

© | Andryushin A.I.
| Vasiliev M.Yu.
| Krakovsky B.D.
| Popov O.M.
| Fokeev F.F.

info@geliymash.ru

ОАО «НПО «Гелиймаш»», Moscow, 115280, Russia

The report presents the results of the development of modern automated cryogenic helium plants for the cryogenic support system of the NICA accelerator complex at the Laboratory of high energy physics of JINR, Dubna. A brief technical description of helium liquefier OG-1000 and satellite helium refrigerator РСГ-2000/4,5 is given. The main technical characteristics and schematic diagrams of the units are given. The design features are considered, the description of the technological process in different modes of operation is presented. The requirements for automated control systems are listed, their main functions and the boundaries of automation are indicated. As a result of the work carried out in ОАО «НПО «Гелиймаш»» the equipment for providing with liquid helium

of electromagnetic system of a complex of accelerators under construction is designed and made.

Keywords: helium, liquefier, refrigerator

Исследование азотных систем охлаждения объектов при температурах ниже 77 К

© | Бондаренко В.Л.¹
| Пилипенко Б.А.²
| Чигрин А.А.²
| Шевкунов С.С.¹

vbondarenko@raregases.org

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

² ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

Рассмотрены методы криогенного обеспечения фазовых концентраторов неонгелиевой смеси и систем разделения неона на изотопные компоненты методом хроматографии. Помимо распространенного варианта охлаждения на основе разомкнутого азотного «цикла», предложены альтернативные приемы отвода тепла конденсации в сепараторах. Среди них — комбинация эжектора и водокольцевого вакуум-насоса, а также одноступенчатые КГМ. Обосновано использование резонансных и вихревых аппаратов для обогащения Ne-He смеси. Для данной технологии характерны перепады давлений, которые во многих случаях бесполезно срабатываются в редукторах на входе в компрессоры. Поэтому безмашинное охлаждение газовых потоков может обеспечиваться без дополнительных затрат энергии. Понижения температуры до $T \leq 68$ К позволяет обогатить Ne-He смесь за счет конденсации азота до уровня 95...96 % и снизить транспортные издержки при перевозке концентраторов. Результаты исследований использованы при модернизации высокорасходных блоков очистки легких инертных газов.

Ключевые слова: Ne-He смесь, дефлегматор, безмашинное охлаждение

Study of Nitrogen Cooling Systems for Objects at Temperatures Below 77 K

© | Bondarenko V.L.¹
| Piliipenko B.A.²
| Chyhrin A.O.²
| Shevkunov S.S.¹

vbondarenko@raregases.org

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² "Cryoин Engineering Ltd.", Odessa, 65026, Ukraine

The methods of cryogenic support of the phase concentrators of the Ne-He mixture and systems for separating neon into isotopic components by chromatography are considered.

In addition to the common cooling option based on an open nitrogen “cycle”, alternative methods of condensation heat removal in separators are proposed. Among them — a combination of an ejector and a liquid ring vacuum pump, as well as single-stage CGM. The use of resonance and vortex devices for enriching the Ne-He mixture is justified. This technology is characterized by pressure differences, which in many cases are uselessly triggered in pressure regulators at the compressor inlet. Therefore, machine-free cooling of gas streams can be provided without additional energy costs. The temperature decrease to $T \leq 68$ K allows the Ne-He mixture to be enriched by nitrogen condensation to the level of 95...96 % and to reduce transportation costs during the transportation of concentrates. The research results were used in the modernization of high-flow units for the purification of light inert gases.

Keywords: Ne-He mixture, reflux condenser, machine-free cooling

Криогенные аспекты сверхпроводящего квадрупольного магнита FFS

© Алтухов Ю.
Агеев А.
Власов А.
Зинченко С.
Каштанов Е.
Козуб С.

fgbu@ihep.ru

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Московская обл., 142281, Россия

В настоящее время создается международный ускорительный комплекс ионов и антипротонов (FAIR, Германия, Дармштадт). НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ создает четыре сверхпроводящих квадрупольных магнита для финальной фокусировки ионного пучка для коллаборации HED@FAIR. Эти магниты должны обладать высоким градиентом магнитного поля 38 Тл/м и большим внутренним диаметром сверхпроводящей обмотки 260 мм, рабочая температура магнитов 4,5 К. В статье дано описание конструкции квадрупольного магнита, приведены результаты прочностных расчетов этого магнита, выполнен анализ тепловых процессов при его эксплуатации, обоснованы требования к криогенной системе четырех сверхпроводящих квадрупольных магнитов, определены режимы работы этой криогенной системы.

Ключевые слова: сверхпроводящий квадрупольный магнит, криогенная система

Cryogenic Aspects of the FFS Superconducting Quadrupole Magnet

© | Altuhov Yu.

fgbu@ihep.ru

| Ageev A.

| Vlasov A.

| Zinchenko S.

| Kashtanov E.

| Kozub S.

NRC “Kurchatov institute” — IHEP, Protvino, Moscow region, 142281, Russia

The international accelerator complex of ions and antiprotons (FAIR) is currently being created at Darmstadt, Germany. NRC “Kurchatov Institute” — IHEP creates four superconducting quadrupole magnets for the final focusing of the ion beam for the HED@FAIR collaboration. These magnets should have a high magnetic field gradient of 38 T/m and a large inner diameter of the superconducting coil of 260 mm, the operating temperature of the magnets is 4.5 K. The article describes of the quadrupole design, presents the results of strength calculations of the magnet and analyzes the thermal processes during its operation, substantiates the requirements for the cryogenic system of four superconducting quadrupole magnets, determines the operating modes of this cryogenic system.

Keywords: superconducting quadrupole magnet, cryogenic system

Промышленные установки для разделения неонгелиевой смеси

© | Бондаренко В.Л.¹

vbondarenko@raregases.org

| Медушевский Е.В.²

| Стефановский А.М.¹

| Чигрин А.А.³

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

² Одесская национальная академия пищевых технологий,
Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
имени В.С. Мартыновского, Одесса, 65039, Украина

³ ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

Проведен анализ технологий переработки неонгелиевого концентрата. Обоснована необходимость снижения удельных затрат энергии на получение легких инертных газов. Показано, что получение гелия путем короткоциклового адсорбции и баромембранного разделения сопровождается крайне низкой степенью извлечения целевого продукта. Исследованы фазовые сепараторы неона ($p = 2,5$ МПа; $T = 25 \dots 27,1$ К) и адсорбционные системы ($p = 1,0$ МПа; $T = 27,1 \dots 77,4$ К). Выявлены резервы уменьшения эксплуатационных расходов, которые позволили разработать новое поколение адсорбционных установок. Созданная техника позволяет из побочного потока неонového производства получать спектрально-чистый гелий (99,9999 %). В отличие от прежних моделей каждая секция адсорберов имеет увеличенный до $0,5 \text{ м}^3$ объем и снабжена высоковакуумной изоляцией. Повышение экономичности достигается пу-

тем увеличения длительности рабочей фазы адсорбера за счет предварительного обогащения смеси в мембранном модуле. Управление комплексом «адсорбер-мембрана» полностью автоматизировано.

Ключевые слова: гелий, неон, адсорбер, мембрана

Industrial Plants for the Separation of Ne-He Mixture

© | Bondarenko V.L.¹ | vbondarenko@raregases.org
| Medushevskiy E.V.²
| Stefanovskyy A.M.¹
| Chyhrin A.O.³

¹BMSTU, Moscow, 105005, Russia

²Institute of Refrigeration Cryotechnology and Ecoenergetics n.a. V.S. Martynovsky, Odessa, 65039, Ukraine

³“CryoIn Engineering Ltd.”, Odessa, 65026, Ukraine

The analysis of processing technologies for neon-helium concentrate was completed. The necessity of reducing specific energy costs for producing light inert gases was justified. It was shown that the production of helium by short-cycle adsorption and baromembrane separation is accompanied by an extremely low degree of extraction of the target product. Neon phase separators ($p = 2.5$ MPa; $T = 25...27.1$ K) and adsorption systems ($p = 1.0$ MPa; $T = 27.1...77.4$ K) were investigated. The reserves for reducing operating costs have been identified, which made it possible to develop a new generation of adsorption installations. The created technique allows us to obtain spectrally pure helium (99.9999 %) from the secondary production of neon. Unlike previous models, each adsorber section has a volume increased to 0.5 m³ and is equipped with high-vacuum insulation. The increase in efficiency is achieved by increasing the duration of the working phase of the adsorber due to the preliminary enrichment of the mixture in the membrane module. Management of the adsorber-membrane complex is fully automated.

Keywords: helium, neon, adsorber, baromembrane

Применение неона в качестве холодильного агента в интервале $T = 18...28$ K

© | Бондаренко В.Л. | vbondarenko@raregases.org
| Матвеев Э.В.
| Меркулов М.Ю.

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

Жидкий неон применяют в качестве хладагента в интервале $T = 26 \pm 1,5$ K. Такой уровень температур позволяет безопасно имитировать некоторые процессы в жидкостных водородных системах, разделять Ne-He смеси и получать изотопные компоненты

неона (^{20}Ne , ^{21}Ne и ^{22}Ne). Твердый неон при $T < 18\text{ K}$ используют в современных фотоприемных устройствах космического базирования для повышения чувствительности датчиков инфракрасного излучения. Проведен анализ и экспериментальное исследование ряда холодильных циклов, которые базируются на располагаемом компрессорном и вакуумном оборудовании. Создан лабораторный ожижитель производительностью 6 л/ч LNe на основе цикла высокого давления с охлаждением рабочего тела в ванне с вакуумируемым азотом. Сборник жидкости связан с криостатом, оборудованным вакуумной системой для откачки паров и перевода неона в твердое состояние. Проведены испытания сублимационного блока при различных уровнях тепловой нагрузки.

Ключевые слова: жидкий неон, твердый неон, ожижитель неона

The Use of Neon as a Refrigerant in the Range of $T = 18...28\text{ K}$

© | Bondarenko V.L.
| Matvieiev E.V.
| Merkulov M.Yu.

vbondarenko@raregases.org

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Liquid neon is used as a refrigerant in the range $T = 26 \pm 1.5\text{ K}$. This temperature level allows simulate safely some processes in liquid hydrogen systems, separate Ne-He mixtures and obtain isotopic components of neon (^{20}Ne , ^{21}Ne и ^{22}Ne). Solid neon at $T < 18\text{ K}$ is used in modern space-based photodetector devices to increase the sensitivity of infrared radiation sensors. The analysis and experimental research of a number of refrigeration cycles, which are based on disposable compressor and vacuum equipment. A laboratory liquefier with a capacity of 6 L/hr LNe was created on the basis of a high pressure cycle with cooling of the working fluid in a bath with evacuated nitrogen. The liquid collector is connected to a cryostat equipped with a vacuum system for pumping out vapors and converting neon into a solid state. Tests of a sublimation unit at various levels of heat load were held.

Keywords: liquid neon, solid neon, neon liquefier

Методы и экспериментальная техника для исследования растворимости газов в жидкостях

© | Бондаренко В.Л.
| Валякина А.В.
| Валякин В.Н.

vbondarenko@raregases.org

anna_valiakina@bmstu.ru

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

В работе рассмотрены экспериментальные методы определения предельных коэффициентов активности, актуальные при реализации расчетных подходов к решению задачи растворимости газа в жидкости. Предпочтение отдается традиционным мето-

дам, которые могут быть воплощены на одной установке с целью получения согласованных термодинамических данных, так как в литературных источниках, зачастую, отсутствует надежная необходимая информация. Реализация методов для разбавленных растворов на установке с ячейкой небольшого объема сопряжена с высокими требованиями к аппаратным средствам и технике эксперимента. В связи с этим повышена чувствительность измерительной системы, улучшены устройства отбора проб и определения состава. Выявлены достоинства и недостатки гравиметрического статического способа определения концентрации компонентов бинарных смесей. Показана недопустимость содержания летучих примесей в исходных веществах, а также необходимость доочистки проблемных образцов. Для решения этой задачи была разработана и создана низкотемпературная лабораторная ректификационная колонна, осуществляющая подготовку исходных компонентов смесей и исследование предельной растворимости в образцах с малым коэффициентом разделения. В качестве пробных экспериментов получены данные по термодинамическим свойствам в системе этилен-бутан, найдена относительная летучесть компонентов в смеси пентан-фтортрихлорметан. Определены степени разделения колонны со змеевиковым и насадочным сменным ректификационным участком. На основании проведенных опытов можно сделать вывод о предпочтительности змеевиковой ректификационной колонны для очистки веществ и измерения предельной растворимости в сравнении с насадочной. При соответствующей подготовке образцов на установке можно получать равноточные данные по растворимости различными методами, что повышает надежность результатов. Гравиметрический статический способ измерения концентрации компонентов бинарных смесей в сочетании с ячейкой малого объема перспективен для исследования малоизученных и редких веществ.

Ключевые слова: растворимость газа в жидкости, термодинамические свойства, экспериментальные методы, бинарные смеси, ректификационная колонна

Methods and Experimental Techniques to Research Solubility of Gases in Liquids

© | Bondarenko V.L.
| Valyakina A.V.
| Valyakin V.N.

vbondarenko@raregases.org
anna_valiakina@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

This paper describes experimental methods for determining the limiting activity coefficients that are relevant in the implementation of theoretical approaches to solve the problem of gas solubility in a liquid. Preference is given to traditional methods, which can be realized on a single installation in order to obtain consistent thermodynamic data, since literary sources there is no reliable necessary information. The implementation of methods for dilute solutions in an installation with a small volume cell is associated with high requirements for measuring tools and experimental equipment. In this regard, the sensitivity of the measuring system has been increased, sampling and composition determination devices have been improved. The advantages and disadvantages of the gravimetric static method for determining the concentration of the components in binary mixtures are revealed. The in-

admissibility of the fugitive impurities content in the initial substances, as well as the need for further purification of problem samples, is shown. To solve this problem, a low-temperature laboratory distillation column was developed and created that prepares the initial components of the mixtures and studies the limiting solubility in samples with a low separation coefficient. As trial experiments, data on the thermodynamic properties in the ethylene-butane system were obtained, and the relative fugacity of the components in the pentane-fluorotrichloromethane mixture was found. The degrees of separation of the column with the coil and packed replaceable distillation section are determined. Based on the conducted experiments, it can be concluded that the coil distillation column is preferable for the purification of substances and measuring the limiting solubility in comparison with the packed one. With appropriate components preparation at the installation, it is possible to obtain uniform data on solubility by various methods, which increases the reliability of the results. The gravimetric static method for measuring the concentration of the components in binary mixtures in combination with a small volume cell is promising for the study of little-researched and rare substances.

Keywords: gas solubility in liquid, thermodynamic properties, experimental methods, binary mixtures, rectification column

Создание и исследование средств транспортировки, хранения, газификации и заправки криогенных жидкостей космических систем

© | Архаров И.А.
Смородин А.И.
Черемных О.Я.

Smorodin38@rambler.ru

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

² НТИ (филиал) УрФУ, Нижний Тагил, 622031, Россия

Описаны разработки водородных, кислородных, СПГ (вагонов-цистерн, контейнеров-цистерн) стационарных изделий на основе ранее созданных конструкций. Представлены результаты исследований по потерям жидкого водорода на натуральных образцах изделий с различными видами теплоизоляции криогенных емкостей хранилищ и транспортных цистерн: многослойно-вакуумной, порошково-вакуумной, экранно-вакуумной (с азотным экраном различной конструкции). Представлены результаты исследований по получению и поддержанию давления в емкости газификационной установки закритических параметров водорода при выдаче в течение длительного периода времени как с постоянным, так и переменным во времени расходам потребителю, как с использованием в качестве теплоносителя стороннего источника водорода, так и части водорода из емкости газификатора, идущего потребителю. Приведены метод и средства заправки баков орбитального корабля жидким водородом высокой частоты при многовариантности их количества и заправляемой массы компонента.

Ключевые слова: вагон-цистерна, контейнер-цистерна, емкость-хранилище, теплоизоляция емкости, газификатор жидкого водорода, сверхкритические параметры криогенной жидкости, система энергопитания орбитального корабля

Creation and Research of Means of Transportation, Storage, Gasification and Refueling Cryogenic Liquids of Space Systems

© Arkharov I.A.
Smorodin A.I.
Cheremnykh O.Y.

Smorodin38@rambler.ru

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² NTI (branch) Ural Federal University, Nizhnii Tagil, 622031, Russia

The development of hydrogen, oxygen, LNG (tank cars, tank containers) stationary products on the basis of previously created designs is described. The results of studies on losses of liquid hydrogen on full-scale samples of products with different types of thermal insulation of cryogenic storage tanks and transport tanks: multilayer-vacuum, powder-vacuum, screen-vacuum (with nitrogen screen of different designs) are presented. The results of studies on obtaining and the maintenance of pressure tanks installation gasification supercritical parameters of hydrogen at the results over a long period of time of constant and variable time costs to the consumer like using as a coolant an external source of hydrogen and part of hydrogen from the vessel of the gasifier, reaching the consumer. The method and means of filling the Orbiter tanks with liquid hydrogen of high frequency with multivariance of their quantity and refueled mass of the component are given.

Keywords: tank car, tank container, storage tank, thermal insulation of the tank, gasifier of liquid hydrogen, supercritical parameters of cryogenic liquid, power supply system of the Orbiter

Повышение эффективности охлаждения ракетного топлива с использованием жидкого азота

© Александров А.А.¹
Бармин И.В.^{1,2}
Денисова К.И.^{1,2}
Чугунков В.В.¹

kafsm8@bmstu.ru

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

² ФГУП «ЦЭНКИ», Москва, 107996, Россия

Приведено описание технологических процессов и математических моделей охлаждения углеводородного ракетного топлива с применением жидкого азота для реализации операций температурной подготовки топлива на стартовых комплексах ракетно-космической техники. Представлены результаты экспериментов и способы повышения эффективности применения жидкого азота в качестве охлаждающей среды в системах температурной подготовки компонентов ракетного топлива с использованием теплообменников и промежуточного теплоносителя в виде антифриза.

Ключевые слова: углеводородное ракетное топливо, охлаждение жидким азотом, технологии и техническая реализация, эффективность систем охлаждения

Improving the Efficiency of Rocket Fuel Cooling Using Liquid Nitrogen

© Aleksandrov A.A.¹
Barmin I.V.^{1,2}
Denisova K.I.^{1,2}
Chugunkov V.V.¹

kafsm8@bmstu.ru

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² Centre of exploitation of ground space infrastructure, Moscow, 107996, Russia

The description of technological processes and mathematical models of hydrocarbon rocket fuel cooling with the use of liquid nitrogen for the implementation of fuel temperature preparation operations at launch complexes of rocket and space technology is given. The results of experiments and methods of increasing the efficiency of liquid nitrogen as a cooling medium in the systems of temperature preparation of rocket fuel components using heat exchangers and an intermediate coolant in the form of antifreeze are presented.

Keywords: hydrocarbon rocket fuel, liquid nitrogen cooling, technologies and technical implementation, efficiency of cooling systems

Многофакторный дисперсионный анализ в оценке ресурса микрокриогенных газовых машин

© Архаров А.М.
Архаров И.А.
Навасардян Е.С.
Шишова Н.Е.

nshishova@bmstu.ru

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

Рассматриваются особенности применения многофакторного дисперсионного анализа ANOVA (Analysis of Variations) для оценки ресурса (времени безотказной работы) микрокриогенных газовых машин (МКГМ). Исследование является логическим продолжением работ отечественных ученых, посвященных развитию методов расчета и оптимального проектирования технических систем [1–4]. Реализация многофакторного дисперсионного анализа производилась в программном комплексе математической статистики Statgraphics (Statgraphics technologies Inc.). В работе представлены результаты обработки расчетных данных, полученные после численного моделирования и их сравнение с результатами испытаний опытных образцов. Приведены примеры формирования блока исходных данных для многофакторного дисперсионного анализа, полученных в ходе тестовых экспериментов при наработке образцов МКГМ на отказ, по четырем независимым факторам (давлению заправки, температуре окружающей среды, конструктивного исполнения и пористости поршня-регенератора). Представляется, что именно многофакторный дисперсионный анализ позволит получить корректные данные о степени влияния на время безотказной работы МКГМ факторов различной направленности, характеризующих: параметры окружающей среды, конструктивное исполнение, технические характеристики и определить глубину и очередность совершенствования аппаратов и узлов МКГМ.

Ключевые слова: МКГМ, надежность, ресурс, время безотказной работы, многофакторный дисперсионный анализ ANOVA (Analysis of Variations)

Multivariate Analysis of Variance in the Resource Estimation of Microcoolers

© Arkharov A.M.
Arkharov I.A.
Navasardyan E.S.
Shishova N.E.

nshishova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The paper discusses the features of the application of ANOVA multivariate analysis of variance (Analysis of Variations) for assessing the operating life (time to failure) of microcoolers. The research is a logical continuation of the work of Russian scientists on the development of calculation methods and the optimal design of technical systems Suslov A.D. et al. (1967), Prilutsky A.I. (2015), Samvelov A.V. (2017), Sherykhalina N.M. (2012). Multivariate analysis of variance was performed in the Statgraphics software package (Statgraphics technologies Inc.). The paper presents the results of processing the calculated data obtained after numerical simulation and their comparison with the test results of prototypes. Examples of the formation of a block of input data for multivariate analysis of variance, obtained during test experiments during MTGM failure time operation, by four independent factors (filling pressure, ambient temperature, design and porous of the regenerator piston) are given. It seems that it is precisely multivariate analysis of variance that will allow obtaining the correct data on the degree of influence of various types of factors affecting the MTTF of microcooler, characterizing: environmental parameters, design, technical characteristics, and determining the depth and priority of improving microcooler devices and components.

Keywords: microcooler, reliability, the operating time, MTTF (mean operating time to failure), ANOVA (Analysis of Variations)

Экономические аспекты технологии производства криптона и ксенона

© Бондаренко В.Л.¹
Лосяков И.А.²
Дьяченко О.В.²

vbondarenko@raregases.org
ilosyakov@cryoin.com
diachenko.cryoin@gmail.com

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

² ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

Показаны этапы производства криптона и ксенона из воздуха, исследованы новые перспективные сырьевые источники тяжелых инертных газов. Проведены технико-экономические исследования установок обогащения первичного криптоноксеноново-

го концентрата типа «Хром-3». При получении нескольких газовых продуктов актуальна задача определения себестоимости каждого из них. Рассмотрены две методики разделения затрат на получение криптона и ксенона в составе криптоноксеноновой смеси. Первая базируется на результатах расчета реальных энергозатрат с учетом коэффициентов распределения. Показано, что в первом случае доли затрат на обогащение Kr и Xe являются функциями их концентраций, степени извлечения и состояния газовых продуктов на выходе из установки. Вторая методика использует результаты анализа рыночных цен на конечные продукты и может быть полезной в процессе принятия решений экономического характера при оценке обоснованности цены на криптоноксеноновую смесь либо решений о целесообразности внедрения определенного типа технологии обогащения Kr-Xe-концентрата при разработке нового сырьевого источника.

Ключевые слова: продукты разделения воздуха, первичный криптоноксеноновый концентрат, криптоноксеноновая смесь, эксергия, затраты, себестоимость

Economic Aspects of Krypton-Xenon Mixture Processing Technology

© | Bondarenko V.L.¹
| Losyakov I.A.²
| Diachenko O.V.²

vbondarenko@raregases.org
ilosyakov@cryoin.com
diachenko.cryoin@gmail.com

¹BMSTU, Moscow, 105005, Russia

²“Cryoin Engineering Ltd.”, Odessa, 65026, Ukraine

The current research analyzes the stages of krypton and xenon production from air are demonstrated and new promising sources of raw inert gases are investigated. Technical and economic studies of the plants similar to Chrom-3 that are designed for the enrichment of the source krypton-xenon concentrated mixture have been carried out. When obtaining several gas products, it is essential to estimate the prime cost of each one. Two methods of dividing the costs for the production of krypton and xenon from the krypton-xenon mixture have been considered. The first one is based on estimating the actual energy consumption in accordance with distribution coefficients. In the first case, the shares of enrichment costs for Kr and Xe are shown as functions of their concentrations, extraction degree and condition of gas products at the plant outlet. The second method uses the analysis results of the market prices for end products and can be applied in the process of making economic decisions to justify the price for a krypton-xenon mixture, or to assess feasibility of introducing a certain type of enrichment technology for Kr-Xe concentrated mixture when developing a new source of raw materials.

Keywords: air separation products, source krypton-xenon concentrated mixture, krypton-xenon mixture, exergy, expenses, prime cost

Опыт организации учета количества инертных газов в сжатых газовых смесях

© | Бондаренко В.Л.¹
| Лосяков И.А.²
| Дьяченко О.В.²
| Дьяченко Т.В.³

vbondarenko@raregases.org
ilosyakov@cryoin.com
diachenko.cryoin@gmail.com
diachenko.tetiana.v@gmail.com

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

² ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

³ Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 65082, Украина

Для планирования производства, а также взаиморасчетов с поставщиками и покупателями очень важно правильно определять количество инертных газов на всех этапах технологической последовательности их получения. В работе представлены гравиметрический и манометрический способы оценки объемов сжатых газов в приложении к чистым газам и их смесям. Приведена сравнительная оценка методик, предлагаемых различными авторами для расчета количества ценных компонентов в сжатых газовых смесях, на основе манометрического метода. Разработан универсальный манометрический метод, позволяющий с достаточной степенью точности определять количество неона и гелия в сжатых газовых смесях. Достоверность расчетной методики была проверена путем сравнения вычисленных объемов инертных газов с результатами реализации гравиметрического метода. На базе разработанной нами модели и данных о сжимаемости компонентов смеси была разработана программа, упростившая расчеты для гелий- и неон-содержащих смесей.

Ключевые слова: инертные газы, газовые смеси, количества сжатого газа, весовой и манометрический методы

Experiment at Registering Inert Gases Amount in Compressed Gas Mixtures

© | Bondarenko V.L.¹
| Losyakov I.A.²
| Diachenko O.V.²
| Diachenko T.V.³

vbondarenko@raregases.org
ilosyakov@cryoin.com
diachenko.cryoin@gmail.com
diachenko.tetiana.v@gmail.com

¹ BMSTU, Moscow, 105005, Russia

² "Cryoin Engineering Ltd.", Odessa, 65026, Ukraine

³ Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 65082, Ukraine

It is very important to correctly determine the amount of inert gases at all stages of the technological sequence of their production for production planning, as well as mutual settlements with suppliers and customers. The proceedings present gravimetric and manometric methods for estimating the volumes of compressed gases applied to pure gases and their mixtures. A comparative assessment of the methods proposed by various authors for calculating the amount of valuable components in compressed gas mixtures based on a mano-

metric method is given. A universal manometric method that allows determining the amount of neon and helium in compressed gas mixtures with a sufficient degree of accuracy has been developed. The reliability of the calculation method was verified by comparing the calculated volumes of inert gases with the results of the gravimetric method implementation. On the basis of the model that we developed and the data on the compressibility of the mixture components, a program was developed that simplified calculations for helium and neon containing mixtures.

Keywords: inert gases, gas mixtures, quantities of compressed gas, gravimetric and manometric methods

Производство воды в качестве побочного продукта регазификации СПГ в засушливых регионах мира

© | Бондаренко В.Л.¹
Дьяченко Т.В.²

vbondarenko@raregases.org
diachenko.tetiana.v@gmail.com

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

² Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 65082, Украина

Рост численности населения и экологические проблемы привели к сложностям снабжения населения чистой водой. Объем запасов пресной воды, пригодной для использования, составляет всего 0,5 % общего объема воды на Земле. В последние несколько десятилетий постоянно расширяется рынок сжиженного природного газа (СПГ). Растет число ожижительных установок и терминалов по приёму и регазификации СПГ. Установки малой производительности, как правило, оснащены атмосферными испарителями и не используют холод регазификации. В настоящей работе представлены результаты расчёта атмосферного испарителя, предназначенного для газификации 250 м³/ч СПГ с различным числом наружных ребер. Оценка объема пресной воды, которую можно получить в процессе утилизации инея, показала, что этот объем довольно значителен и может обеспечить суточное потребление нескольких человек. Указанный источник можно рассматривать в качестве перспективного альтернативного источника водоснабжения в случае размещения регазификационных установок в засушливых регионах.

Ключевые слова: альтернативные источники водоснабжения, сжиженный природный газ, атмосферный испаритель, вымораживание воды из атмосферного воздуха

Production of Water as a By-Product of LNG Regasification in the Drought-Afflicted Regions

© | Bondarenko V.L.¹
| Diachenko T.V.²

vbondarenko@raregases.org
diachenko.tetiana.v@gmail.com

¹BMSTU, Moscow, 105005, Russia

²Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 65082, Ukraine

The population growth and environmental problems have led to difficulties in supplying people with clean water. The volume of fresh water reserves suitable for use is only 0.5 % of the total volume of water on Earth. In the past few decades, the market for liquefied natural gas (LNG) has been steadily expanding. The number of liquefaction plants and terminals for LNG obtaining and regasifying is growing. Regasification plants with low productivity, as a rule, are equipped with atmospheric evaporators and does not use regasification cold. This paper presents the calculation data for an atmospheric evaporator intended for the gasification of 250 m³/h of LNG with various numbers of outside edges. The estimation of the fresh water volume that can be obtained in the process of frost utilization has shown that this volume is quite significant and can provide a daily water consumption for several people. It can be a promising alternative source of water supply in the case of placing regasification plants in drought-afflicted regions.

Keywords: alternative sources of water supply, liquefied natural gas, atmospheric evaporator, freezing of water from atmospheric air

Численное теплофизическое моделирование криовоздействий в Ansys

© | Бурков И.А.
| Пушкарев А.В.
| Шакуров А.В.
| Цыганов Д.И.
| Жердев А.А.

shacurov@bmstu.ru

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

Описаны современные достижения и проблемы теплофизического моделирования медицинский криовоздействий. Приведены рекомендации, которые могут быть применимы к большинству современных FEA программных комплексов (апробированы в Ansys CFX 19.2). Описаны способы уточнения геометрических моделей, теплофизических свойств, граничных условий и подходы к параметризации расчетной области. Приведены примеры расчетов задач криоабляции и криотерапии.

Ключевые слова: криовоздействие, моделирование, ANSYS, CFX, теплообмен, FEA

Numerical Thermal Simulation of Cryoexposure Using Ansys

© | Burkov I.A.
Pushkarev A.V.
Shakurov A.V.
Tsiganov D.I.
Zherdev A.A.

shacurov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The current advances and problems of medical cryoexposure thermal simulation are considered. Recommendations on improving geometric models, thermophysical properties, boundary conditions, and for parameterizing of the computational domain are proposed. These recommendations can be applied to most modern FEA software packages (tested in Ansys CFX 19.2). Examples of cryoablation and cryotherapy simulation are presented.

Keywords: cryoexposure, simulation, heat transfer, FEA, ANSYS, CFX

Изменение температуры адсорбента при адсорбционных процессах

© | Файнштейн В.И.

vladlen.fainshtein@criogenmash.ru

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

Рассмотрены результаты расчетного исследования процесса короткоциклового безнагревной адсорбции на примере осушки воздуха методом КЦА с использованием программного продукта ASPEN ADSORPTION. Установлено, что в адсорберах КЦА имеет место достаточно сложная термическая обстановка, обусловленная циклическим протеканием процесса с реверсивным изменением направлений потоков и малой продолжительностью стадий процесса (продуцирование, сброс давления, продувка, наполнение). В результате неполного удаления влаги при безнагревной регенерации (продувки) происходит постоянное накопление влаги в слое адсорбента-осушителя. Распределение накапливающейся влаги, по высоте слоя осушителя весьма неравномерно. Оно зависит от условий выполнения как стадии адсорбции, так и десорбции и в значительной степени от предыстории работы адсорбента. Максимальное количество влаги (кмоль/кг, или % вес.) находится на осушителе в конце стадии «продуцирование» и минимальное в конце стадии «регенерация». Количественно накопление влаги в слое осушителя выражается в том, что при непрерывной работе и постоянных условиях на входе ($C_0 = 6000$ ppm, $p = 6$ ата, $T_{вх} = 303$ К) в течение около 7 суток, это примерно 1000 циклов, продолжительностью 10 мин, на значительной доле слоя осушителя (более 50 %) накапливается влага в количествах, близких к 1,23 кмоль/кг адсорбента (примерно 22 % вес.), при общем количестве более 60 кг. При числе циклов около 2000 количество влаги находящейся на осушителе, примерно в 70 раз больше циклового поступления влаги и оно продолжает увеличиваться. Присутствие в адсорбере значительного количества накопленной влаги приводит при многократном протекании процесса к существенным изменениям распределения температур

адсорбента по длине слоя. В связи с этим реальные температуры адсорбента значительно отличаются от температуры газа на входе в осушитель.

Ключевые слова: короткоцикловая безнагревная адсорбция, осушитель, адсорбент, влага, накопление, цикловое поступление, температура, стадии цикла, продуцирование, безнагревная регенерация, продувка, равновесно-циклическое состояние

The Temperature Change of the Adsorbent During Adsorption Processes

© | Feinstein V.I.

vladlen.fainshtein@criogenmash.ru

PJSC “Kriogenmash”, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia

The results of a computational study of the pressure swing adsorption process are considered using the PSA method as an example of drying air using the ASPEN ADSORPTION software product. It has been established that a rather complex thermal situation takes place in CCA adsorbers due to the cyclic process flow with a reversal of flow directions and the short duration of the process steps (production, pressure relief, purge, filling). As a result of incomplete removal of moisture during non-heating regeneration (purging), there is a constant accumulation of moisture in the adsorbent-desiccant layer. The distribution of accumulated moisture along the height of the desiccant layer is very uneven. It depends on the conditions of fulfillment of both the adsorption and desorption stages and, to a large extent, on the prehistory of the adsorbent. The maximum amount of moisture (kmol/kg, or % weight) is on the dehumidifier at the end of the “production” stage and the minimum at the end is “regeneration”. Quantitatively, the accumulation of moisture in the desiccant layer is expressed in the fact that during continuous operation and constant conditions at the inlet ($C_0 = 6000$ ppm, $p = 6$ ata, $T_{\text{вх}} = 303$ K) for about 7 days, this is about 1000 cycles, lasting 10 minutes, for a significant proportion of the desiccant layer (more than 50 accumulates moisture in amounts close to 1.23 kmol / kg of adsorbent (approximately 22 % weight), with a total amount of more than 60 kg. With a number of cycles of about 2000, the amount of moisture on the dehumidifier is about 70 times the cyclic amount of moisture and it continues to increase. The presence of a significant amount of accumulated moisture in the adsorber leads to significant changes in the temperature distribution of the adsorbent along the length of the layer during repeated process. In this regard, the actual temperature of the adsorbent is significantly different from the temperature of the gas at the inlet to the dryer.

Keywords: short-cycle non-heating adsorption, desiccant, adsorbent, moisture, accumulation, cyclic intake, temperature, stages of a cycle, production, non-heating regeneration, purge, equilibrium-cyclic state

Переходный режим работы неона-гелиевого криогенного рефрижератора на базе цикла Брайтона для будущего циклического коллайдера

© | Савельева С.
Клёппель Ш.
Хаберстрох К.
Квак Х.

sofiya.savelyeva@tu-dresden.de

Технический университет Дрездена, Дрезден, 01062, Германия

Концепт криогенной системы будущего циклического коллайдера включает в себя 10 криогенных рефрижераторов на базе цикла Брайтона, разработанных в Техническом университете Дрездена, применяемых для охлаждения лучевых и тепловых экранов. В качестве расчетной точки для разработки рефрижераторов был выбран режим с максимальной холодопроизводительностью 680 кВт на установку в диапазоне от 40 до 60 К для лучевых и тепловых экранов, включая компенсацию потерь вторичного цикла, а также 270 кВт в диапазоне от 300 до 40 К для предохлаждения гелиевого цикла. Однако в течение работы ускорителя стабильная циркуляция пучка чередуется с фазой восстановления луча. Эта фаза может длиться от 25 до 60 % рабочего цикла ускорителя и приводит к снижению тепловой нагрузки. В результате чего криогенная система работает значительную часть времени при условиях частичной нагрузки со снижением холодопроизводительности до 3,8 раз. Переходный режим работы был детально исследован для обеспечения высокой эффективности цикла во всем рабочем диапазоне. Стратегия контроля частичной нагрузки была оптимизирована для получения высокой эффективности обеих групп рабочих колес многоступенчатого турбокомпрессора.

Ключевые слова: неона-гелиевая смесь, цикл Брайтона, частичная нагрузка

Transient Operation of the Neon Turbo-Brayton Cryogenic Refrigerator for the FCC-hh

© | Savelyeva S.
Kloepfel S.
Haberstroh Ch.
Quack H.

sofiya.savelyeva@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Dresden, 01062, Germany

The concept of the FCC-hh cryogenic system includes 10 Turbo-Brayton cryogenic refrigerators for the beam screens and thermal shields cooling, which have been developed at TU Dresden. The design point for these refrigerators was chosen to provide a maximum cooling power of 680 kW per plant at 40 to 60 K for beam screens and shielding together with secondary cycle losses compensation, as well as 270 kW at 300 to 40 K for the pre-cooling of the helium cycle. However, within the accelerator operation a stable beam circulation is followed by a turn-around phase to recover the beam. This phase can last from 25 to 60 %

of the full accelerator operation time and results in a reduced heat load. Hence, the cryogenic system operates significant time in a part-load mode with a turndown ratio of up to 3.8. In order to ensure a high efficiency of the cycle within the entire operation range, a cycle part-load was studied in detail. A part-load control strategy was optimised to get a high efficiency of both casings of the multistage turbo-compressor.

Keywords: neon-helium mixture, Turbo-Brayton cryogenic refrigerator, part-load mode

Сценарии аварий криогенного емкостного оборудования для СПГ

© | Горбачев С.П.¹
| Клеблеев Т.И.²

S_Gorbachev@gwise.vniigaz.gazprom.ru

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», п. Развилка, Московская обл., 142717, Россия

² АО «НПП "Криосервис"», Москва, 105043, Россия

Рассматриваются аварийные ситуации в криогенных резервуарах с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией при нарушении герметичности внутреннего сосуда и трубопроводов обвязки. Показано, что если в резервуарах для жидких продуктов разделения воздуха основной опасностью является разрушение внутреннего сосуда из-за повышения внешнего давления, то в резервуарах для СПГ, наряду с опасностью разрушения внутреннего сосуда, имеет место опасность загазованности территории, обусловленная выбросом жидкости из резервуара в атмосферу.

Ключевые слова: криогенные резервуары, хранение СПГ, аварийные ситуации, разгерметизация сосудов

Accident Scenarios of Cryogenic Storage Equipment for LNG

© | Gorbachev S.P.¹
| Klebelev T.I.²

S_Gorbachev@gwise.vniigaz.gazprom.ru

I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

¹ LLC "Gazprom VNIIGAZ", v. Razvilka, Moscow region, 142717, Russia

² JSC «NPP "Cryoservice"», Moscow, 105043, Russia

The report discusses emergencies in cryogenic tanks with vacuum-powder or vacuum-multilayer insulation in case of violation of the tightness of the inner vessel and pipelines. It was shown that while in tanks for liquid air separation products the main danger is the destruction of the inner vessel due to an increase in external pressure, then in the LNG tanks, along with the danger of destruction of the inner vessel, there is a danger of gas contamination due to the release of liquid from the tank into the atmosphere.

Keywords: cryogenic tanks, LNG storage, emergency situations, vessel depressurization

Экспериментальные исследования лабораторной СПГ-установки, работающей по циклу на многокомпонентной смеси хладагентов

© Кротов А.С.
Колесников А.С.
Самохвалов Я.В.
Пронин Д.М.
Кузнецов Р.А.

krotov.ax@gmail.com

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

Проведен анализ текущего состояния малотоннажного производства СПГ в России. Выполнено сравнение различных технологий малотоннажного производства СПГ. Описана математическая модель для расчёта и оптимизации состава и режимов работы установки. Приведена схема лабораторного стенда для исследования лабораторной СПГ-установки, работающей по циклу на многокомпонентной смеси хладагентов. Проведены эксперименты по влиянию расхода и давления продукционного потока на параметры установки. Определены удельные и термодинамические характеристики цикла.

Ключевые слова: СПГ, смесевой хладагент, анализ цикла

Experimental Research of Laboratory-Scale LNG Plant with Mixed Refrigerant Cycle

© Krotov A.S.
Kolesnikov A.S.
Samokhvalov Ya.V.
Pronin D.M.
Kuznetsov R.A.

krotov.ax@gmail.com

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Small-scale LNG market and production in Russia is observed. Comparison of different technologies for small-scale natural gas liquefaction is made. Calculation model and optimization method for mixed refrigerant composition and working regimes are given. Scheme of laboratory-scale LNG plant with mixed refrigerant cycle is provided. Experiments for researching influence of production flow parameters on plant characteristics are carried out. Specific and thermodynamic parameters of the cycle are calculated.

Keywords: liquefied natural gas, mixed refrigerant, cycle analysis

Определение гидравлических потерь в пористых структурах методом численного моделирования

© | Кулик В.В.
| Навасардян Е.С.

vikakulik687@gmail.com

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

Создание пористых структур с заданной или прогнозируемой пористостью и проницаемостью — задача, решение которой сопряжено сегодня с целым рядом технических сложностей и особенностей. В тоже время формирование целого ряда устройств, имеющих в своем составе пористые структуры различного назначения, включая теплообменные аппараты — регенераторы необходимо проводить на основе новых подходов, отказавшись от «случайной» компоновки пористой структуры из известных примитивов типа сеток, сфер, проволоки и сочетаний этих примитивов. Современные технологии проектирования пространственных структур особенно развиты сегодня в медицине и геологии, в области криогенной техники развитие данного направления выглядит весьма перспективным. Данная работа посвящена изучению методов проектирования регулярных и нерегулярных пористых структур с целью разработки современного инженерно-научного аппарата, объединяющего методики проектирования пористой структуры и проведения численного эксперимента для определения таких характеристик пористой структуры как пористость, гидравлическое сопротивление, проницаемость, компактность, а также поиск корреляций для определения аналитическим способом фактора трения пористой структуры. Основным объектом исследования в работе является структура пористого регенератора микрокриогенной газовой машины полной холодопроизводительностью 0,5 Вт при температуре охлаждения 77 К (базовая модель Ricor 508). В работе представлены результаты исследований зависимости гидравлического сопротивления от типа пористой структуры, пористости, направления действия потока, среды и давления на входе в структуру.

Ключевые слова: пористые структуры, регенератор, пористая насадка

Determination of Hydraulic Losses in Porous Structures by Numerical Simulation

© | Kulik V.V.
| Navasardiyan E.S.

vikakulik687@gmail.com

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The creation of porous structures with a given or predicted porosity and permeability is a task whose solution today involves a number of technical difficulties and features. At the same time, the formation of a number of devices containing porous structures for various purposes, including heat exchangers — regenerators, it must be based on new approaches, avoiding the “random” composition of the porous structures from known primitives such as grids, spheres, wire and combinations of these primitives. Modern technologies for

designing spatial structures in medicine and geology are especially developed today, and in the field of cryogenic technology the development of this direction looks very promising. This work is devoted to the study of design methods for regular and non-regular porous structures in order to develop a modern engineering and scientific apparatus that will combine the methods of designing a porous structure and conducting a numerical experiment to determine such characteristics of a porous structure as porosity, hydraulic resistance, permeability, compactness, and the search for correlations for the analytical determination of the friction factor of the porous structure. The main object of study is the structure of the porous regenerator of cryocooler with a total cooling capacity of 0.5 W at a cooling temperature of 77 K (basic model Ricor 508). The paper presents the results of studies of the dependence of hydraulic resistance on the type of porous structure, porosity, direction of flow, medium and pressure at the entrance to the structure.

Keywords: porous structures, regenerator, porous nozzle

Разработка компенсатора температурных деформаций для криогенного гелиевого трубопровода

© Щербань А.А.
Кулик В.В.
Навасардян Е.С.

razepana@mail.ru
vikakulik687@gmail.com

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

При разработке криогенных трубопроводов для перевалочных операций с жидкими азотом и, особенно, гелием основную сложность представляет создание протяженных участков магистралей, длиной более 3м из-за наличия линейных температурных деформаций, вызванных резким изменением температуры стенки трубки при воздействии криогенных температур. Несмотря на то что ведущие производители криогенного оборудования предлагают целый ряд различных технических решений и устройств для компенсации температурных деформаций, каждый разработчик сталкивается с целым рядом конструктивных проблем, таких как подбор размеров под заданную геометрию трубопровода, высокая стоимость, сложность в сборке и испытаниях стандартных компенсаторов. В связи с этим разработка новых конструкций компенсаторов линейных деформаций или устройств, позволяющих реализовать функции сильфона за счет своей геометрии, является актуальной задачей. В работе представлены конструкция и результаты расчетов (математического моделирования) тепловых потоков, величины линейных деформаций разработанного компенсатора.

Ключевые слова: криогенный трубопровод, компенсатор, тепловые деформации, линейное расширение, сильфон

Development of a Temperature Strain Compensator for a Cryogenic Helium Pipeline

© | Shcherban A.A.
Kulik V.V.
Navasardiyan E.S.

razepana@mail.ru
vikakulik687@gmail.com

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

When developing cryogenic pipelines for transporting liquid nitrogen and, especially, helium, the main difficulty is the creation of extended sections of highways longer than 3 m due to the presence of linear temperature deformations caused by a sharp change in the temperature of the tube wall under the influence of cryogenic temperatures. Although the leading manufacturers of cryogenic equipment offer a number of different technical solutions and devices for compensating for temperature deformations, each developer faces a number of design problems, such as selection of sizes for a given pipeline geometry, high cost, difficulty in assembling and testing standard expansion joints. Thereby the development of new designs of compensators for linear deformations or devices that allow to realize the functions of the bellows due to its geometry is an urgent task. The paper presents the design and results of calculations (mathematical modeling) of heat fluxes, linear strain values of the developed compensator.

Keywords: cryogenic pipeline, compensator, thermal deformation, linear expansion, bellows

Особенности малотоннажного производства СПГ на газораспределительных станциях

© | Горбачев С.П.
Медведков И.С.

S_Gorbachev@gwise.vniigaz.gazprom.ru
I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», п. Развилка, Московская обл., 142717, Россия

На газораспределительной станции (ГРС) сжиженный природный газ производится за счет использования перепада давлений между магистральным и распределительным газопроводами без дополнительных затрат энергии. В работе рассматривается влияние эффективности расширительных устройств на качество (состав) СПГ, вопросы осушки и очистки газа перед сжижением, а также производство СПГ при сезонном изменении расхода газа через ГРС.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, ожижитель, газораспределительная станция

Features of Small-Scale LNG Production at Gas Distribution Station

© | Gorbachev S.P.
| Medvedkov I.S.

S_Gorbachev@gwise.vniigaz.gazprom.ru
I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

LLC "Gazprom VNIIGAZ", v. Razvilka, Moscow region, 142717, Russia

At the gas distribution station (GDS) liquefied natural gas is produced at the expense of use of pressure drops between mainline and distribution pipelines without additional energy costs. The paper examines the impact of the efficiency of expansive devices on the quality (composition) of LNG, issues of drying and cleaning gas before liquefaction, LNG production at a seasonal change in gas consumption through the GDS.

Keywords: liquefied natural gas, gas distribution station