

На правах рукописи

Пуртов Сергей Николаевич

УДК 621.59

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОНОВЫХ И НЕОНО-ГЕЛИЕВЫХ
КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК**

05.04.03 Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, системы кондиционирования
и жизнеобеспечения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2001

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Архаров А.М

Научный консультант: кандидат технических наук
Бондаренко В.Л.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бродянский В.М.
доктор технических наук, профессор
Филин Н.В.

Ведущая организация: ОАО «НПО Гелиймаш»

января 2002 года в 14³⁰ час. на засе-
141.16 при Московском государствен-
Баумана по адресу: 107005, Москва,
института «Энергомашиностроение».

575805

Путевое
Моделирование не по-земпларе, заверенный печатью, про-
ны в естественных
000 000 я в библиотеке МГТУ им.

01г.

жны заблаговременно известить
ций на имя председателя Совета.

Глухов С.Д.

Глухов С.Д.

1575805

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1575805
Путевое С.Н. Моделирование

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Современное развитие промышленности характеризуется увеличением производства высокотехнологичной продукции – электроники, компьютеров, систем связи, то есть всего того, с чем связывают возникновение «информационного общества». В производстве этой продукции широко используются инертные газы, получаемые из воздуха в качестве побочных продуктов крупных воздухоразделительных установок, в том числе неон, потребление которого в настоящее время быстро увеличивается. Годовое потребление неона выросло с 75 тыс. м³ в 1995 г. до 300 тыс. м³ в 2001 г. Среди наиболее перспективных направлений использования неона необходимо отметить космическую технику (системы сублимационного охлаждения), производство газовых лазеров, плазменных (плоских) телевизионных экранов.

После освоения в 1997-99 г. промышленного выпуска проводов из высокотемпературных сверхпроводящих материалов усилился интерес к использованию неона и неона-гелиевой смеси для их охлаждения. По сравнению с водородом и гелием неон обладает такими преимуществами, как инертность, существенно более высокая плотность, большая теплота испарения. Для разработки систем охлаждения высокотемпературных сверхпроводящих устройств необходимо знание таких характеристик неоновых криогенных циклов, как степень термодинамического совершенства, удельная холодопроизводительность и т.д. В связи с этим исследование неоновых криогенных циклов является актуальным. Из-за высокой стоимости неона использование более дешевой неона-гелиевой смеси может оказаться более выгодным, чем неона.

В связи с ростом потребления неона актуально создание установок для разделения неона-гелиевой смеси с производительностью в несколько раз больше, чем у эксплуатирующихся в настоящее время. Совершенствование процесса разделения неона-гелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом позволяет уменьшить затраты энергии на разделение смеси, повысить коэффициент извлечения неона и производить комплексное разделение смеси с получением чистых неона и гелия.

Цель работы. Целью работы является разработка метода моделирования и исследование криогенных циклов на неоне и неона-гелиевой смеси и повышение эффективности установок для разделения неона-гелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом.

Научная новизна работы.

- предложена математическая модель криогенной установки и на ее основе разработана программа, позволяющая проводить автоматизированный расчет и оптимизацию криогенных неоновых и неона-гелиевых рефрижераторных и ожижительных установок;

- получены аналитические зависимости для расчета фазового равновесия неоне-гелиевой смеси и создана программа расчета термодинамических свойств неоне-гелиевой смеси на ЭВМ;
- с использованием программы автоматизированного расчета выполнен анализ неоновых и неоне-гелиевых криогенных рефрижераторных циклов на температурный уровень 27÷44 К. Установлено, что степень термодинамического совершенства циклов на неоне и неоне-гелиевой смеси выше, чем гелиевых циклов. Показано, что степень термодинамического совершенства неоновых рефрижераторных циклов увеличивается при уменьшении температуры криостатирования в исследованном диапазоне температур;
- предложена усовершенствованная схема установки для разделения неоне-гелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом, позволяющая уменьшить затраты энергии на разделение смеси и затраты на создание установки, повысить надежность работы установки.

Практическая ценность. В результате исследования промышленной установки для получения неона высокой чистоты производительностью 30 м³/ч, эксплуатирующейся в настоящее время в СП «Айсблик», даны рекомендации по модернизации подобных установок. Модернизация позволяет повысить коэффициент извлечения неона с 92 % до 97 % и уменьшить потери неона в 4 раза по сравнению с существующей установкой. Разработана схема усовершенствованной установки для разделения неоне-гелиевой смеси, использующей холодильный цикл на перерабатываемой смеси с получением газообразного чистого неона, чистого гелия и жидкого неона. Новая схема позволяет уменьшить затраты энергии на разделение на 42 % по сравнению с существующей установкой, снизить капитальные затраты на создание установки, исключить потери неона. Результаты работы внедрены в СП «Айсблик» при создании установки для получения неона высокой чистоты из неоне-гелиевой смеси. Программы для автоматизированного расчета криогенных установок и расчета свойств неоне-гелиевой смеси используются на кафедре Э-4 МГТУ им. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались 5-й международной конференции «Cryogenics-98» (Чехия, 1998 г.), конференции ICEC 17 (Великобритания, 1998), на XX международном конгрессе по холоду (Австралия, 1999), криогенном симпозиуме (Атланта, США, 2000), в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1999). По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений, содержит 176 стр. текста, 15 таблиц и 77 рисунков. Список литературы из 116 наименований.

Во введении показаны актуальность исследования неоновых и неоногелиевых рефрижераторных криогенных установок на температурный уровень 27÷44 К, и необходимость совершенствования процесса разделения неоногелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом, намечены цель и задачи исследования, перечислены основные результаты работы, дана оценка их научной новизны и практической значимости.

В первой главе проведен анализ работ в области получения неона и его использования в технике. Рассмотрены методы математического моделирования криогенных установок и установок для разделения неоногелиевой смеси. Выполнен обзор работ по применению неона в качестве рабочего тела криогенных установок, в том числе для криостатирования высокотемпературных сверхпроводящих устройств.

Проведенный анализ методов получения неона показал, что наибольшее распространение для промышленного получения неона получил конденсационный метод разделения неоногелиевой смеси, впервые предложенный Л. Бевилогиа. Он отличается непрерывностью процесса и большой производительностью. В то же время конденсационный метод не позволяет производить разделение неоногелиевой смеси с одновременным получением чистых неона и гелия. Для создания установок для разделения неоногелиевой смеси на чистые неон и гелий, необходимо использование нескольких методов разделения. Повышение производительности таких установок требует использования более эффективных технологических схем. Использование ЭВМ для расчета установок разделения неоногелиевой смеси позволяет провести выбор оптимальной схемы и параметров установки. Анализ существующих моделей и программ для расчета криогенных установок показал, что они в большинстве случаев позволяют проводить расчет и оптимизацию одной заранее заданной схемы криогенной установки. При моделировании КУ, как правило, приходится рассчитывать и оптимизировать различные варианты схем КУ и из них выбирать наилучшую. Переход от одной схемы к другой ведет к необходимости каждый раз переделывать программу расчета на ЭВМ. В связи с этим возникает задача создания такой программы, которая позволяла бы рассчитывать любую схему, если заданы элементы схемы и их связи.

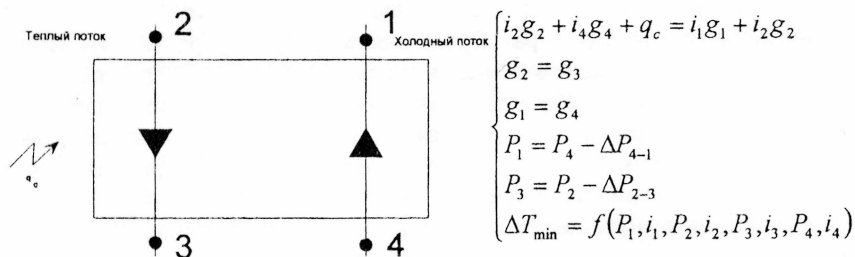
Создание программы расчета и оптимизации криогенных установок, работающих на неоногелиевой смеси, требует разработки подпрограммы расчета термодинамических свойств смеси.

Анализ использования неона в криогенной технике показал, что при использовании в качестве криоагента неон по сравнению с водородом и гелием обладает такими преимуществами, как инертность, высокая плотность, большая теплота испарения. Появление промышленных высокотемпературных сверхпроводящих устройств усилило интерес к криостатированию при темпе-

ратурах ниже 50 К. Непрерывное криостатирование при этих температурах может осуществляться с использованием только трех веществ - неона, водорода и гелия. В то же время высокая стоимость неона ограничивает его применение в криогенной технике. Если циклы с использованием неона и неон-гелиевой смеси имеют большую термодинамическую эффективность, чем гелиевые циклы, то использование неона и неон-гелиевой смеси может оказаться более выгодным, чем гелия. Отсутствие зависимости η_c неоновых рефрижераторных циклов от температуры криостатирования не позволяет осуществить обоснованный выбор рабочей температуры ВТСП-устройства.

На основании проведенного анализа процесса получения неона, методов математического моделирования криогенных установок и использования неона в криогенной технике поставлена цель работы, сформулированы задачи исследования, выбраны и обоснованы методы решения поставленных задач.

Во второй главе выполнено исследование процесса моделирования криогенных установок. Криогенная установка (КУ) представлена как сложная система, состоящая из набора элементов, связанных между собой потоками массы и энергии. Изменение параметра любого элемента установки обычно приводит к изменению параметров всех других ее элементов. В качестве элементов используются аппараты и машины, входящие в состав КУ: теплообменники, ванны с жидким криоагентом, детандеры и т.д. Математические модели для элементов представляют собой набор уравнений, выражающих законы термодинамики, гидродинамики и теплообмена для потоков рабочих веществ, протекающих через эти элементы. Эти модели в зависимости от решаемой задачи могут быть разной степени сложности и позволяют по известным входным параметрам элемента рассчитывать его выходные параметры. Так как в данной работе была поставлена задача автоматизировать термодинамический расчет КУ, то в качестве моделей элементов использовались уравнения материального и энергетического балансов, применяемые при таких расчетах. Например, модель двухпоточного теплообменника представлена системой уравнений:



В общем виде система уравнений k -го элемента представляется в виде:

$$\begin{aligned} f_1^k(p^k) &= 0; \\ &\dots; \\ f_i^k(p^k) &= 0; \\ &\dots; \\ f_n^k(p^k) &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

где $p^k = p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k$ - вектор параметров k -го элемента, n^k - число параметров k -го элемента, n^k - число уравнений для k -го элемента. Параметры, входящие в эти уравнения, не разделяются на входные и выходные. Это связано с тем, что при произвольной схеме КУ заранее неизвестно, какие из параметров элемента окажутся входными. Разделение параметров на входные и выходные производится логической процедурой анализа математической модели всей КУ. Если для уравнения $f_i^k(p_1^k, p_2^k, \dots, p_j^k, \dots, p_n^k)$ известны все параметры, кроме p_j^k , то это уравнение может быть решено относительно p_j^k и $p_j^k = f_i^{*k}(p_1^k, \dots, p_{j-1}^k, p_{j+1}^k, \dots, p_n^k)$.

Данному варианту решения i -уравнения k -го элемента присваивается код jik . Для того, чтобы получить математическую модель всей КУ при наличии математических моделей элементов КУ необходимо задать структуру КУ. Формализованное представление о структуре КУ задается уравнениями связи в виде:

$$p_i^{k_1} = p_j^{k_2}, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 - номера соответствующих элементов. В данной работе связи элементов осуществляются через специальный элемент "точка схемы". Параметрами данного элемента являются G, P, T, h, s, x , код вещества. Параметры точки схемы, принадлежащей двум элементам, считаются равными. В качестве входных параметров должны быть заданы код вещества и в однофазной области любая из комбинаций $(P, T), (P, h), (P, s)$. Остальные параметры находятся по уравнению состояния вещества. В двухфазной области задаются параметры (P, x) или (P, h) или (P, s) .

Кроме уравнений элементов и уравнений связи, для расчета КУ могут быть заданы ограничения в виде неравенств (например, разность температур в теплообменниках должна быть больше минимального значения) и в виде равенств:

$$\begin{cases} g(p_i) = 0 \\ h(p_i) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Для реализации данных ограничений в данной работе введен специальный элемент "связь между элементами". Использование этого элемента позволяет ввести связи между параметрами, не предусмотренные структурой схемы, и определить целевую функцию оптимизации как параметр.

Для того, чтобы полностью закончить построение математической модели КУ, необходимо из множества параметров КУ выделить входные параметры. Выделение входных параметров и разделение их на постоянные и варьируемые производится исследователем КУ с учетом физического смысла задачи, решаемой в процессе моделирования.

Система уравнений $(1,2,3)$ вместе с входными параметрами представляет математическую модель КУ. Если все входные параметры заданы правильно, то расчет системы уравнений $(1,2,3)$ дает единственное решение. Обычно часть входных параметров может варьироваться и тогда система $(1,2,3)$ имеет множество решений. Задачей моделирования КУ в этом случае является определение оптимальных параметров, при которых заданный критерий эффективности (целевая функция) имеет минимальное (максимальное) значение.

Особенностью математической модели КУ является то, что она включает в себя несколько десятков уравнений, большинство из которых нелинейны, так как свойства реальных газов и жидкостей описываются виртуальными уравнениями состояния, которые являются полиномами высокой степени от температуры и плотности. Решение таких систем уравнений стандартными методами представляет большие трудности. Учет структуры схемы КУ позволяет существенно уменьшить число переменных, так как отдельные элементы КУ связаны только с последующими и предыдущими. При заданном значении входных переменных во многих случаях можно рассчитать схему КУ как последовательность элементов. Поэтому в большинстве работ, посвященных исследованию КУ, для каждой установки разрабатывался алгоритм расчета, учитывающий структуру схемы и заключающийся в последовательном решении уравнений элементов, входящих в КУ. И хотя обычно алгоритмы расчета математических моделей КУ выполнены в виде отдельных процедур, разработка программы, организующей вызов этих процедур, требовала от исследователя КУ знания языка программирования, на котором составлены процедуры расчета каждого элемента, и выполнения тестирования и отладки организующей программы.

В данной работе разработана логическая процедура анализа системы уравнений $(1,2)$, позволяющая выработать последовательность решения этой системы уравнений, и после реализации этой процедуры на языке Паскаль полностью автоматизировать расчет любой КУ, набранной из элементов, включенных в программу моделирования. Данная процедура не производит никаких расчетов, а выполняет логические операции и в зависимости от их результата выдает последовательность кодов процедур решения уравнений элементов КУ, которая затем используется подпрограммой расчета и оптимизации.

Для работы процедуры анализа в данной работе математическая модель элемента КУ дополняется параметрами, показывающими возможность включения уравнений данного элемента в последовательность решения системы

уравнений (1,2). Всем параметрам p_i^* присваивается целочисленный указатель zp , которому для входных параметров пользователем присваивается значение $zp=1$. При анализе системы уравнений, если какое-то из них может быть решено и из решения определяется параметр p_i^* , то процедура анализа присваивает для данного параметра $zp=2$, а код решения этого уравнения включается в последовательность расчета. Каждый элемент КУ имеет собственную процедуру анализа математической модели элемента, позволяющую определить, какое из уравнений математической модели элемента может быть решено и передать код решения этого уравнения в последовательность решения уравнений (1,2). Основная процедура анализа последовательно обращается к процедурам анализа элементов, пока не сформирует необходимую последовательность расчета. При такой организации анализа добавление в моделирующую программу новых элементов, если для них разработана процедура анализа, не требует внесения изменений в процедуру анализа всей КУ.

После того, как выработана последовательность расчета, задача моделирования КУ сводится к определению значений варьируемых входных параметров, обеспечивающих минимум (максимум) целевой функции, при выполнении ограничений, заданных уравнениями (3):

$$\begin{aligned} \min L(x) \text{ [или } \max L(x)] \\ x \in X \end{aligned} \quad (4)$$

$$X = \{x \in E^n, h_i(x) = 0, g_i(x) \geq 0\}$$

На основании предложенного процесса моделирования была разработана программа автоматизированного термодинамического расчета произвольной КУ (ПАРКУ), состоящей из следующих элементов: «точка схемы», теплообменник, детандер, изотермический компрессор, сборник жидкости, разветвление и соединение потоков.

После того, как пользователь вводит элементы схемы и определяет, какие параметры считать входными, он вызывает программу-анализатор, которая вырабатывает последовательность вызова процедур расчета уравнений элементов. Затем пользователь вводит параметры оптимизации, целевую функцию, ограничения и с помощью программы оптимизации находит значения параметров, обеспечивающих максимум или минимум целевой функции. Учитывая, что ограничения при анализе КУ имеют вид неравенств $h(x) >= 0$ при составлении программы оптимизации использовался метод комплексов Бокса, являющийся разновидностью метода Недлера-Мида для задач с ограничениями в виде неравенств.

ПАРКУ написана на языке Delphi фирмы Borland с использованием современных технологий объектно-ориентированного и визуального программирования. Возможности программы могут быть расширены добавлением новых элементов. Удобный интерфейс позволяет производить использование про-

граммы пользователю, не являющемуся специалистом в области программирования. На рис. 1 показано главное окно расчета и оптимизации ПАРКУ.

Для расчета фазового равновесия жидкость-пар неоне-гелиевой смеси на основании обработки экспериментальных данных (Heck and Battick (1967), Клопф (1967) были получены аналитические зависимости.

Для жидкости при $T \leq 29,91 \text{ K}$ значение концентрации гелия в жидкости определяется по формуле:

$$x_1 = a(P - P_s) \quad (5)$$

$$a = 0.000019183T^2 - 0.00092103T + 0.0113957$$

Значения концентрации неона в паре y_2 при $T < 29,91 \text{ K}$ определяются по формуле:

$$y_2 = 1 - y_1 = (\alpha_1 + 1) \frac{P}{P_s} \quad (6)$$

$$\alpha_1 = a(P - P_s) + b(P - P_s)^2$$

$$a = 0.00002920T^3 - 0.01364T^2 + 0.04261T + 0.3373$$

$$b = -0.000003205T^3 + 0.0002775T^2 + 0.078202$$

Если $T > 29,91$, то в программе по заданным параметрам смеси P, T, y_1 с помощью зависимостей $T_{кр} = T_{кр}(P)$ определяется критическая температура смеси. Если $T < T_{кр}$, то значения концентраций x_1 и y_1 в жидкой и паровой фазах определяются посредством интерполяции между ближайшими изотермами, а в области вблизи критической точки – интерполяцией между значением y_1 на критической кривой и ближайшей изотермой.

В третьей главе с использованием ПАРКУ выполнен термодинамический анализ рефрижераторных циклов на неоне и неоне-гелиевой смеси в интервале температур $27 \div 44 \text{ K}$ и циклов ожижения неона. На рис. 3 показаны схемы анализируемых циклов - цикла с дросселированием (1 – с предварительным охлаждением (ПО) жидким азотом при 77 K , 2 – с двумя ступенями ПО жидким азотом при 77 K и 65 K , 3 – с двойным дросселированием и двумя ступенями ПО), с детандером (4 – без ПО, 5 – с ПО при 77 K); комбинированных циклов с дросселированием и детандером (6 – без ПО, 7 – с ПО при 77 K), а также для сравнения гелиевых циклов с детандером (4 и 5).

На рис. 4,а приведена зависимость η_i анализируемых циклов от давления сжатия прямого потока при температуре криостатирования $T_x = 27 \text{ K}$.

Получено, что η_i неоновых циклов выше, чем гелиевых. Наличие детандеров незначительно повышает степень термодинамического совершенства циклов, поэтому их использование можно рекомендовать только для крупных установок. На рис. 4,б приведена зависимость η_i анализируемых циклов от температуры криостатирования. На этом же графике показана статистическая зависимость η_i от температуры криостатирования для гелиевых циклов. Установлено, что η_i неоновых циклов увеличивается при уменьшении T_x , что связано с влиянием свойств неона.

Основным препятствием для более широкого использования неона является его высокая стоимость. При замене гелия на неон в криогенной установке изменяются ее эксплуатационные затраты, например, затраты энергии уменьшаются, а затраты, связанные с потерями криоагента при работе, увеличиваются. Для оценки влияния стоимости криоагента на эксплуатационные затраты проведен расчет циклов на неоно-гелиевой смеси с учетом стоимости газа, теряемого при работе установки.

Схемы исследованных циклов показаны на рис. 3-2, 4, 5. Установлено, что для дроссельного цикла (рис. 3-2) концентрация смеси, обеспечивающая минимум затрат на компенсацию потерь газа, соответствует концентрации получаемой из воздуха неоно-гелиевой смеси. Для циклов с детандером (рис. 3-4, 5) при концентрации неона в смеси меньше 75 % затраты на компенсацию потерь газа практически постоянны.

В связи с тем, что транспортировку больших количеств неона выгоднее осуществлять в жидком виде, выполнен анализ ожижительных неоновых циклов. Расчет показал, что коэффициент ожижения неона достигает 30 %, затраты энергии на предварительное охлаждение составляют более 50 % от общих затрат энергии и для снижения затрат энергии на ожижение неона необходимо использование эффективной ступени предварительного охлаждения.

В четвертой главе выполнено исследование промышленной установки для получения неона высокой чистоты, предложены пути модернизации установки, позволяющие повысить коэффициент извлечения неона и предложена усовершенствованная установка для разделения неоно-гелиевой смеси.

Схема промышленной установки для получения неона высокой чистоты приведена на рис. 5. Установка оснащена системой измерений, позволяющей производить контроль параметров в основных точках. Результаты измерения параметров установки при ее промышленной эксплуатации в режиме получения чистого неона и в режиме получения жидкого неона при ее промышленной эксплуатации позволили определить значения теплопритоков. Суммарная величина теплопритоков составила 570 Вт, из них 461 Вт к верхней части установки и 109 Вт к нижней части установки. Полученные на основании данных о промышленной эксплуатации установки значения теплопритоков были использованы в дальнейших расчетах.

Анализ термодинамической эффективности промышленной установки показал, что ее степень термодинамического совершенства составляет 2 %, причем затраты энергии на получение жидкого азота составляют более 70 % от общих затрат энергии на разделение смеси. Следовательно, уменьшение расхода жидкого азота позволяет сократить затраты энергии на разделение смеси.

Одним из основных показателей установок для разделения неоно-гелиевой смеси является значение коэффициента извлечения неона. Содержание неона в отбросном потоке гелия определяется условиями фазового равновесия в па-

роотделителе 11 (рис. 5). При понижении температуры в пароотделителе до 25 К возможно снижение содержания неона в отбросном потоке гелия до 5 %. Возможные варианты понижения температуры в пароотделителе показаны на рис. 6. Охлаждение смеси до температуры ниже температуры кипения неона в ректификационной колонне может осуществляться жидким неоном, кипящим под вакуумом. Откачка паров неона может производиться вакуум-насосом (рис. 6,а) или эжектором (рис. 6,б). В настоящее время отбросной поток гелия выводится из установки при давлении 2,5 МПа, затем его давление уменьшается до 0,1 МПа. Если произвести расширение этого потока с 2,5 МПа до 0,1 МПа с генерацией холода, то холодный расширенный поток можно использовать для охлаждения дефлегматора. Для расширения потока может быть использован волновой криогенератор (рис. 6,в). Рассмотренные варианты модернизации могут быть осуществлены в существующих установках, так как они не требуют значительного изменения схемы.

Выполнено сравнение различных циклов установок разделения неоно-гелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом, которое показало, что использование цикла на перерабатываемой смеси позволяет снизить затраты энергии на разделение и упростить схему установки. Показано, что использование для предварительного охлаждения жидкого азота, кипящего под вакуумом, не дает существенных преимуществ по сравнению с использованием жидкого азота, кипящего при атмосферном давлении. В то же время использование жидкого азота, кипящего при атмосферном давлении, упрощает использование холода его паров и повышает надежность установки за счет отсутствия вакуум-насоса.

Результаты исследования установок для разделения неоно-гелиевой смеси использовались при разработке схемы усовершенствованной установки для получения неона высокой чистоты и гелия, схема которой приведена на рис. 7. Использование холодильного цикла на перерабатываемой смеси позволяет уменьшить затраты энергии на разделение смеси на 42 % по сравнению с существующей установкой и уменьшить капитальные затраты на создание установки. Для очистки отбросного потока гелия от неона используются адсорбция при 27 К. Возможно получение части неона в виде жидкости или использование установки как ожижителя неона.

Выводы

1. Разработанная математическая модель и программа автоматизированного расчета криогенных установок (ПАРКУ) позволяют проводить расчет и оптимизацию различных схем криогенных установок.
2. Выполненный с использованием «ПАРКУ» расчет криогенных рефрижераторных циклов на неоне и неоне-гелиевой смеси показал, что степень термодинамического совершенства неоновых циклов выше, чем гелиевых, поэтому использование неона и неоне-гелиевой смеси в качестве рабочего тела криогенных установок является перспективным.
3. Получена зависимость степени термодинамического совершенства неоновых рефрижераторных циклов от температуры криостатирования и установлено, что в диапазоне температур 27..45 К степень термодинамического совершенства неоновых циклов увеличивается при уменьшении температуры криостатирования.
4. Проведенная обработка экспериментальных данных по фазовому равновесию неоне-гелиевой смеси позволила получить новые аналитические зависимости для расчета фазового равновесия неоне-гелиевой смеси и реализовать эти зависимости в виде программы.
5. На основании данных, полученных при промышленной эксплуатации установки для получения неона высокой чистоты производительностью 30 м³/ч, определены значения теплопритоков к установке, использованные в дальнейших расчетах.
6. Даны рекомендации по модернизации установки для получения неона высокой чистоты, позволяющие повысить коэффициент извлечения неона с 92 % до 97 % и уменьшить содержание неона в отбросном потоке в 3 раза с 15 % до 5 %.
7. Предложена новая схема установки для разделения неоне-гелиевой смеси, использующая холодильный цикл на перерабатываемой смеси, которая позволяет уменьшить расход энергии на разделение смеси на 40 % по сравнению с существующими установками, уменьшить число теплообменных аппаратов. Схема установки позволяет производить получение как чистых газообразных неона и гелия так и получение части неона в виде жидкости.
8. Результаты работы внедрены СП «Айсблик» при создании установки для разделения неоне-гелиевой смеси конденсационно-ректификационным методом.

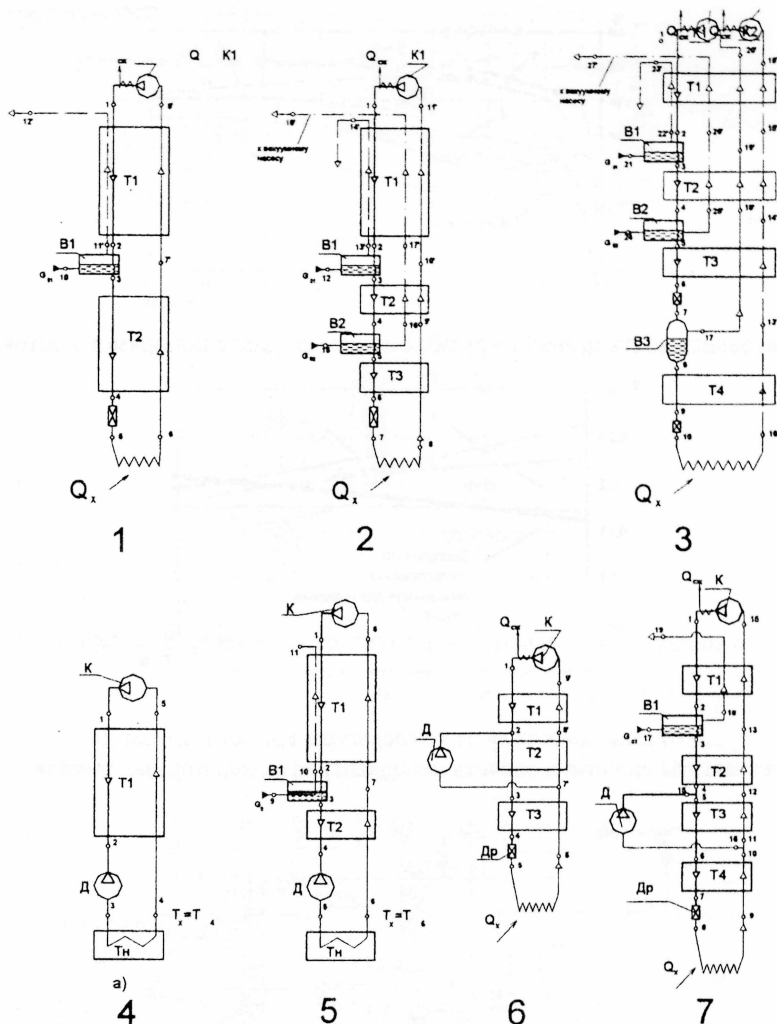
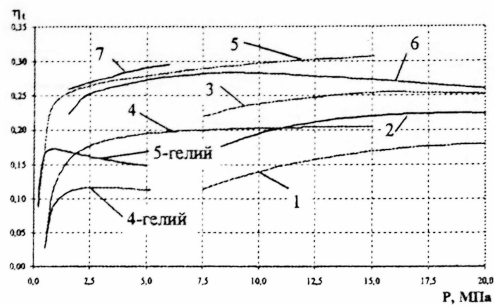
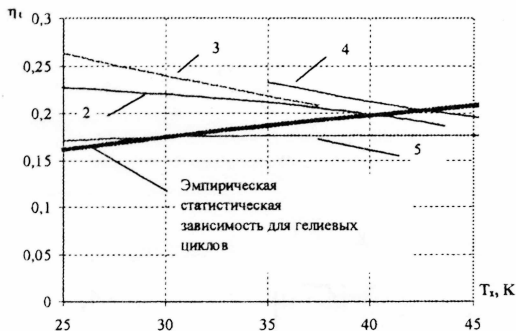


Рис. 3. Схемы анализируемых неоновых и гелиевых циклов

1-цикл с дросселированием и ПО при 77 К; 2-цикл с дросселированием и ПО при 65 К; 3- цикл с двойным дросселированием и ПО при 65 К; 4-цикл с детандером 5-цикл с детандером и ПО при 77 К; 6-комбинированный цикл с детандером и дросселированием; 7-комбинированный цикл с ПО при 77 К, детандером и дросселированием



а) зависимость η_i анализируемых циклов от давления прямого потока



б) зависимость η_i от температуры криостатирования

Рис. 4. Результаты анализа и расчета неоновых рефрижераторных циклов

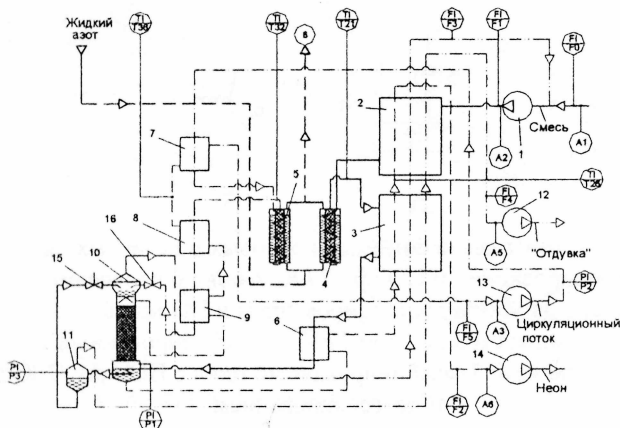


Рис. 5. Схема промышленной установки для получения неона высокой чистоты

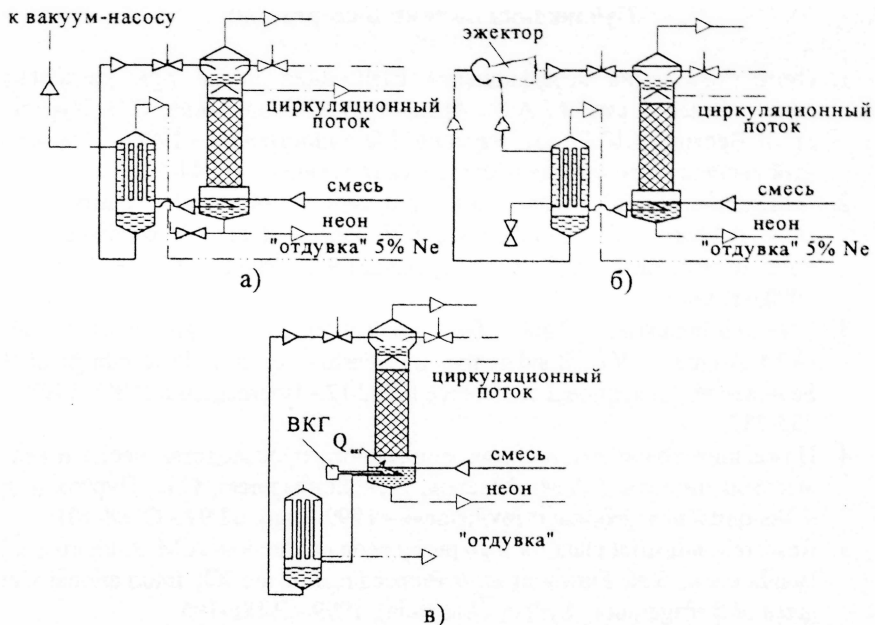


Рис. 6. Варианты модернизации установки для разделения неона-гелиевой смеси

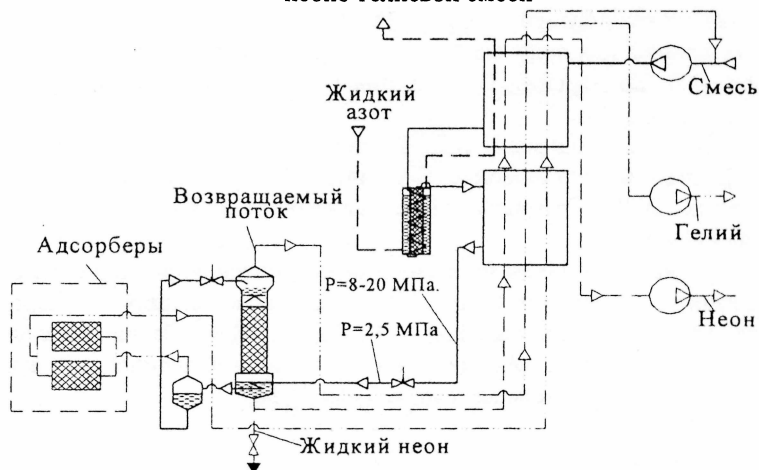


Рис. 7. Схема усовершенствованной установки для разделения неона-гелиевой смеси

Публикации по теме диссертации:

1. Пути повышения коэффициента извлечения неона при разделении неоне-гелиевой смеси / А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др. // Вестник МГТУ им. Баумана. Машиностроение.- 1998.- Специальный выпуск «Криогенная и холодильная техника».- С.44-52.
2. Research-industrial plant for production of high purity neon /A.M. Arkharov, V.L. Bondarenko, S.N. Purtov et al.// Proceedings of the Fifth International conference Cryogenics'98,- Prague (Czech Republic), 1998.- P. 68-69.
3. Research-Industrial Plant for production of high purity neon /A.M. Arkharov, V.L. Bondarenko, S.N. Purtov et al. // Proceedings of the Seventeenth International conference ICEC 17.- Bournemouth (UK), 1998.- P. 735-737.
4. Поколение новой техники для криогенного производства неона и гелия высокой чистоты / А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др. // Холодильная техника и технология.- 1999.-Вып. 62/99.- С. 88-101.
5. Research-industrial plant for high purity neon production/ A.M. Arkharov, V.L. Bondarenko, S.N. Purtov et al. // Proceedings of the XX International Congress of Refrigeration. Sydney (Australia), 1999.- P 186-195.
6. Neon-Helium Mixtures Separation by Adsorption and Freezing /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, S.N. Purtov et al // Proceedings of 12th Inter-society Cryogenic Symposium.- Atlanta (USA), 2000.- P 71-79.
7. Новая техника для получения неона и гелия высокой чистоты /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др. // Холодильная техника. – 2000.- №5.- С. 2-5.
8. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Пуртов С.Н. Автоматизированный расчет криогенных установок // Вестник МГТУ им. Баумана. Машиностроение.- 2000.- Специальный выпуск «Криогенная и холодильная техника».- С. 43-49.
9. Рефрижераторные циклы на неоне и неоне-гелиевой смеси для криостатирования высокотемпературных сверхпроводящих устройств /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов, М.Ю. Савинов // Вестник МГТУ им. Баумана. Машиностроение.- 2000.- Специальный выпуск «Криогенная и холодильная техника».- С. 50-58.

Подписано к печати 13.12.2001 Зак. 173г. Объем 1.0 п.л. Тир. 100
Типография МГТУ им. Баумана