

На правах рукописи

Бондаренко Виталий Леонидович

УДК 621.59

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ
КРИОГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
ПОЛУЧЕНИЯ НЕОНА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2003

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

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
А.М. Архаров

Офиц

1609485

Авт. Волгаренков.М.

технических наук,
академик РАН

1 Сер. и числ.

Волновых криоген-6

технических наук, профессор

2003

инко

27.05.

27

технических наук, профессор

9022014

161

ров

Ведущая

1609485

30 час. на
Московском
по адресу:
факультета

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

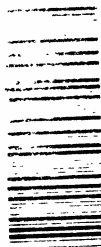
обозначенного здесь срока

библиотеке

с печатью
исква, 2-я
о Совета

из
ия с

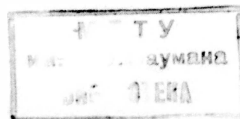
с.д



Актуальность темы. Работа направлена на создание безмашинных волновых криогенераторов (ВКГ) и на их применение для повышения эффективности установок и технологий разделения воздуха и редких газов, в частности, при получении неона высокой чистоты.

Низкотемпературные процессы разделения газовых смесей обычно реализуются в установках, в которых генерируется холод. Холодопроизводящие процессы в рабочих циклах таких установок сопровождаются уменьшением энтальпии рабочего тела, и часто реализуются с помощью детандеров – расширительных машин объемного или лопаточного типов. Детандеры обладают высокой эффективностью (η , достигает 92÷94 %), однако их надежность ограничена, они характеризуются конструктивной сложностью и высокой стоимостью. Безмашинные дроссельные расширительные устройства обладают существенно большей надежностью, конструктивно не сложны и не дороги, однако адиабатный процесс расширения в них газа без совершения внешней работы не является холодопроизводящим ($i=const$), что и обуславливает меньшую, как правило, термодинамическую эффективность установок с дросселированием. Этим объясняется пристальный интерес к попыткам создания безмашинного холодопроизводящего оборудования, одним из видов которого являются волновые криогенераторы. ВКГ сочетают в себе простоту и надежность дроссельных расширительных устройств (поскольку не имеют в своей конструкции ни одной движущейся детали) со способностью отводить энергию от рабочего тела на существенно более высокий температурный уровень. ВКГ могут работать и в режимах температурного разделения газовых потоков, что так же делает их привлекательными при организации процессов охлаждения и энергетического разделения газовых потоков. Принцип действия ВКГ заключается в трансформации кинетической энергии струи газа в акустическую, тепловую или электрическую с выводом последней в среду с более высокой температурой. Энтальпия расширенного в устройстве газа при этом понижается и он охлаждается в большей степени, чем при дросселировании (см. рис. 1,б).

Работы по созданию и исследованию волновых криогенераторов были начаты в 1979 году в проблемной и отраслевой лабораториях газодинамических методов получения холода МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке заместителей министров Н.Ф. Краснова и Г.Ф. Шеина и выполнялись на протяжении ряда лет совместно с ОАО «Криогенмаш», ОАО «Гелийшмаш» и Акустическим институтом им. Н.Н. Андреева. Подобные исследования так называемых пульсационных охладителей газа



(ПОГ) проводились параллельно во ВНИИГазе. Исследованиями процессов температурной стратификации газовых струй руководил академик А.И. Леонтьев.

Несмотря на большой интерес к подобного рода холодопроизводящим устройствам, а также к температурным стратификаторам, они остаются малоизученными, что объясняется прежде всего сложностью проблемы трансформации энергии газового потока и ее передачи вовне, и отсутствием достаточно полных физических представлений о характере происходящих в них газодинамических и тепловых процессов. Тем не менее, эти направления в технике низких температур развиваются, а практическое применение ВКГ, терморазделителей и термостратификаторов расширяется. В данной работе это показано на ряде примеров, в том числе для решения проблемы повышения коэффициента извлечения неона при разделении неона-гелиевой смеси. Неон и другие инертные газы используются для производства высокотехнологичной электронной продукции, которая обеспечивает стремительное развитие общества. Особенностью современного рынка является увеличение спроса на неон высокой чистоты, с содержанием примесей менее 10 ppm. Неон используется в газоразрядных лампах и светодиодах, при производстве газовых лазеров и плазменных телевизионных экранов. В космической технике неон применяется в качестве хладоносителя в системах сублимационного охлаждения. В перспективе неон будет использован в качестве рабочего тела при получении температур от 27 до 44 К, для криостатирования высокотемпературных сверхпроводящих устройств, приемников инфракрасного излучения, а также криоконденсационных панелей в системах криовакуумной откачки.

Цель работы – разработка принципов организации и расчета рабочих процессов в волновых криогенераторах – расширительных холодопроизводящих аппаратах нового типа; создание ВКГ и их применение для повышения эффективности современных криогенных установок и технологий разделения воздуха и редких газов, в частности, при разделении неона-гелиевой смеси и получении чистого неона.

В соответствии с поставленной целью в работе рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Анализ механизмов тепловыделения и теплоотвода в энергопреобразующих трубках волнового криогенератора низкого давления.
2. Исследование структуры воздушных, гелиевых и фреоновых сверхзвуковых недорасширенных кольцевых струй в диапазоне температур $300 \div 10$ К.

3. Анализ рабочих процессов в волновых криогенераторах с резонансной трубкой. Определение составляющих потерь холодопроизводительности и оценка их эффективности.
4. Разработка методики расчета волновых криогенераторов высокого давления с несколькими энергопреобразующими трубками.
5. Создание и исследование волновых криогенераторов с концентрирующими камерами расширения эллипсоидного и параболоидного типов.
6. Создание и исследование волновых криогенераторов с одной либо несколькими резонансными трубками в диапазоне температур 300 ± 10 К с разными рабочими газами.
7. Разработка циклов и схем криогенных установок с волновыми криогенераторами и проведение опытно-промышленных испытаний волновых криогенераторов в составе воздухоразделительных, гелиевых и неоновых установок. Определение области эффективного использования волновых криогенераторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые показана возможность реализации процесса волнового расширения газа при криогенных температурах с отводом энергии в окружающую среду, либо на температурный уровень предыдущей ступени охлаждения и разработаны принципы организации рабочих процессов в волновых криогенераторах.
2. Изучены структуры гелиевых, воздушных и фреоновых кольцевых недорасширенных струй при низких температурах.
3. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований созданы принципиально новые холодопроизводящие аппараты – волновой криогенератор эллипсоидного типа, волновой криогенератор параболоидного типа и волновой криогенератор с резонансной трубкой, которые могут работать и в режимах температурного разделения газовых потоков.
4. Детально исследованы волновые криогенераторы с резонансной трубкой и пульсационные охладители газа на воздухе высокого давления ($P_{вх}=10 \div 20$ МПа) и на гелии в диапазоне параметров ($P_{вх}=1 \div 0,3$ МПа, $T_{вх}=8 \div 20$ К). У исследованных криогенераторов получены изотропные КПД 9,5 %, 18 % и 8,5 % соответственно.
5. Предложены и реализованы схемы воздухоразделительной установки, криогенной гелиевой установки и установок для получения неона высокой чистоты с использованием волновых криогенераторов в качестве расширительных холодопроизводящих устройств.

Научная новизна работы подтверждается девятнадцатью авторскими свидетельствами и международными патентами.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. На основе проведенных исследований сформулированы общие принципы расчета и проектирования волновых криогенераторов.
2. Разработаны и исследованы конструкции холодопроизводящих аппаратов нового типа, реализующих процесс волнового расширения газа, в частности, волновой криогенератор эллипсоидного типа, волновой криогенератор параболического типа, волновой криогенератор с резонансной трубкой и волновой криогенератор с несколькими резонансными трубками – пульсационный охладитель газа.
3. Предложены и реализованы схемы криогенных установок с ВКГ: воздухоразделительной, гелиевой и установки очистки неон-гелиево-азотной смеси с дополнительным сепаратором азота на базе волнового криогенератора с резонансной трубкой, работающего при температуре 66 К. Проведены промышленные испытания созданных установок.
4. Создана криогенная установка для получения неона высокой чистоты, реализующая конденсационно-ректификационный метод разделения неон-гелиевой смеси, с использованием волнового криогенератора с резонансной трубкой (в качестве расширительного холодопроизводящего устройства на выходе из паротделителя отбросного потока гелия).

Реализация результатов работы обеспечивает годовой экономический эффект на уровне 15 млн. руб. в год.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается:

- использованием современных средств и методов исследования рабочих процессов в волновых криогенераторах;
- хорошей повторяемостью полученных результатов измерений;
- промышленными испытаниями и эксплуатацией волновых криогенераторов в составе созданных криогенных установок.

На защиту выносятся:

- теоретические и экспериментальные исследования волновых криогенераторов как расширительных холодопроизводящих устройств нового типа;
- принципы проектирования и методология расчета волновых криогенераторов, основанные на подробном исследовании процесса волнового расширения газа;
- оригинальные конструкции волновых криогенераторов;
- практическое использование волновых криогенераторов в промышленности.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- III Всесоюзной научно-технической конференции по холодильному машиностроению (Москва, СССР, 1982 г.)
- XVI конгрессе Международного института холода (IIR) (Париж, Франция, 1983 г.)
- всесоюзной конференции по криогенной и холодильной технике (Ленинград, СССР, 1984 г.)
- международной конференции «Криопрага-86» (Прага, Чехия, 1986 г.);
- научно-практической конференции по криогенной технике (Балашиха, СССР, 1986 г.)
- XVII конгрессе Международного института холода (IIR) (Вена, Австрия, 1987 г.)
- конференции комиссий В1 и В2 Международного института Холода (IIR) (Университет Purdue, США, 1988 г.)
- международной конференции «Криогеника-98» (Прага, Чехия, 1998 г.);
- 17-й международной конференции по криогенной технике (ICES) (Бёрнмаф, Великобритания, 1998 г.)
- XX конгрессе Международного института Холода (IIR) (Сидней, Австралия, 1999 г.);
- международной конференции «Криогеника-2000» (Прага, Чехия, 2000 г.);
- 12-ом симпозиуме по криогенной технике Американского института химического машиностроения (AIChE) (Атланта, США, 2000 г.);
- международной конференции «Криогеника-2002» (Прага, Чехия, 2002 г.);
- на заседаниях кафедры Э-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 и 2001 г.

Личный вклад автора заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в разработке конструкций волновых криогенераторов и схем криогенных установок, во внедрении волновых криогенераторов в криогенную технику.

Все вошедшие в диссертационную работу результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Работы, по материалам которых написаны разделы (2.4-2.7, 3.2-3.4, 4.1-4.3) выполнены с соавторами (А.М. Архаров, М.Ю. Савинов, И.А. Гольман, Р.С. Мухамедов, В.И. Липа, Н.П. Лосяков, А.А. Голубев).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 70 печатных работ, в том числе 13 авторских свидетельств СССР и 6 международных патентов США, Великобритании, Германии, Японии, Франции.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы из 210 наименований. Работа изложена на 292 страницах машинописного текста, содержит 140 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель диссертационной работы.

В первой главе проводится анализ литературных источников по данной теме. Излагаются основные гипотезы, объясняющие физическую сущность происходящих в ВКГ процессов. Здесь же рассматриваются основные результаты исследования ВКГ на базе газоструйных излучателей и резонансных труб. В результате анализа имеющейся информации формулируются основные задачи, подлежащие решению (см. стр. 2).

В своих исследованиях автор опирался на работы А.М. Архарова, А.И. Леонтьева, Л.Г. Лойцанского, Б.П. Константинова, А.Т. Десятова, Ю.Я. Борисова, Н.В. Филина, Б.Д. Краковского, Ю.А. Лаухина, Д.М. Боброва, Релея, Коанда, Э. Броше и А. Марески и других авторов, в которых рассмотрены теоретические и прикладные вопросы акустики, газовой динамики, генерации холода и температурной стратификации газовых струй.

Вторая глава посвящена исследованию рабочего процесса волнового криогенератора с резонансной трубкой.

1. Предложена физическая модель рабочего процесса в волновом криогенераторе с резонансной трубкой. Дана оценка вклада в тепловой баланс ВКГ-РТ (см. рис. 1,а) основных составляющих механизма тепловыделения и теплоотвода. Показано преобладающее влияние ударно-волнового нагрева газа и второстепенное влияние тепловыделения из-за трения в пристенном слое. Основным рабочим процессом является тепломассобмен между газом струи и нагретым в трубке газом при значительном влиянии продольного переноса тепла из застойной зоны энергопреобразующей трубки в зону проникновения струи газа из сопла.

2. Проведен анализ зависимости адиабатного КПД ВКГ-РТ от ряда режимных и геометрических параметров. Показано влияние степени расширения и входной температуры газа на эффективность ВКГ. Определены оптимальные значения степени расширения. Показана перспективность применения ВКГ-РТ в криогенной технике ввиду возможно-

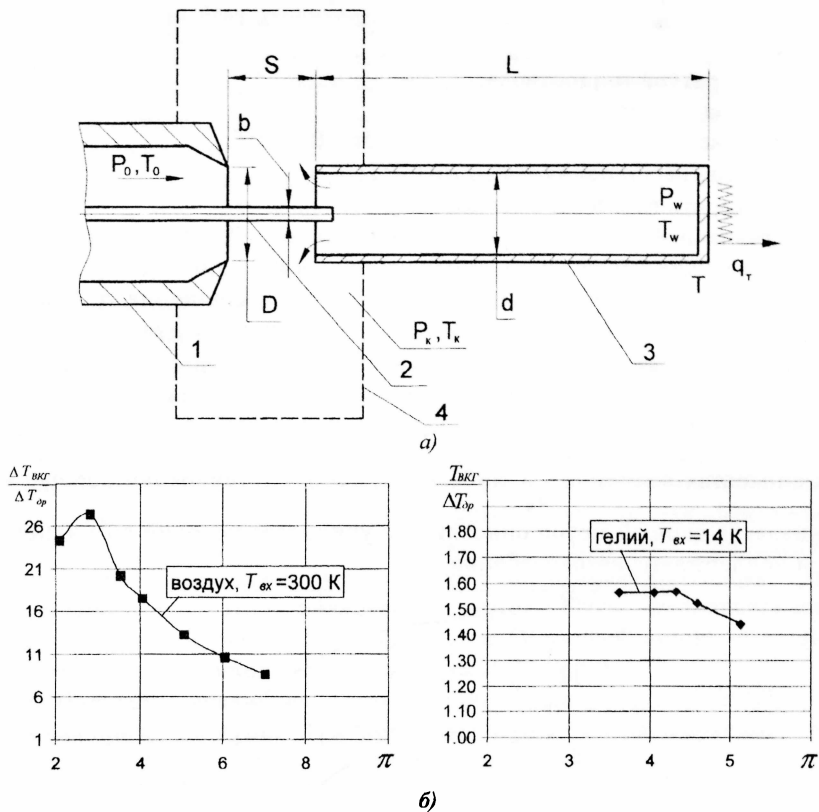


Рис. 1. а) Схема ВКГ-РТ: 1- сопло, 2- осевой стержень, 3- резонансная трубка, 4- камера расширения; б) отношение понижения температуры при волновом расширении газа к понижению температуры при дросселировании по экспериментальным данным для воздуха и гелия

сти отвода тепла на существенно более высокий температурный уровень.

Получено уравнение зависимости адиабатного КПД волнового криогенератора с резонансной трубкой от геометрических и режимных параметров, которое дает реалистичные количественные оценки:

$$\eta_s = \frac{F q_m}{G \Delta i_s} \approx A \frac{F}{F_c} \frac{\rho}{\sqrt{P_0 \rho_0}} \frac{T^{3/2}}{T_0} \left[1 - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1)$$

$$\text{где } A = \sqrt{\frac{R(k+1)}{2k^2} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{2}{k-1}}},$$

где:

T_0, P_0, ρ_0 – температура, давление и плотность газа на входе в ВКГ-РТ;

T – температура теплоотвода;

F_c – площадь сечения сопла ВКГ-РТ;

F – площадь сечения резонансной трубки ВКГ-РТ;

π – степень расширения газа в ВКГ-РТ;

ρ – плотность газа в зоне теплоотвода;

Подставив в формулу (1) экспериментально найденные параметры, обеспечивающие реализацию автоколебательного режима в ВКГ-РТ, получим значения η_s при варьировании степени расширения π . Зависимость $\eta_s = f(\pi)$ оказывается весьма схожей с экспериментальной, показывая не только качественное (наличие экстремума), но и количественное сходство (рис. 2). Имеющееся увеличение расхождения значений η_s и $\eta_s^{\text{эксп}}$ при $\pi < 3,5$ объясняется тем, что при малых значениях π в реальных аппаратах величина $\frac{\Delta P}{P_w}$ либо мала, либо автогенерации вообще не возникает, а данный метод описания не учитывает условий возникновения и поддержания автоколебаний.

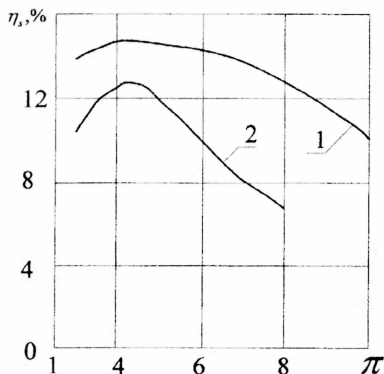


Рис. 2. Зависимость адиабатного КПД ВКГ-РТ от отношения давлений на входе и выходе ВКГ-РТ: 1- расчет; 2- эксперимент;

Получено уравнение, позволяющее оценить потери теплоты, выносимой струей из трубки в фазе выпуска и потери теплоты за счет теплопроводности газа и стенок:

$$q_m = q_{m0} + q_{m2} + q_{m3}, \text{ где } q_{m0} = f \frac{k+1}{\sigma k^2} \int_{L-l_s}^L P_m \left(\frac{\Delta P_m}{P_m} \right)^3 dx, \quad (2)$$

где q_{m0} – отводимая газом теплота, выделяемая на глубине проникновения газа в трубку в фазе впуска;

q_{m2} и q_{m3} – величины, характеризующие часть «вымываемой» теплоты, которая выделилась на глубине большей, чем глубина проникновения струи, и доставлена в «вымываемый» объем продольным теплопереносом по газу (q_{m2}) и по стенкам (q_{m3}).

Показано, что при расположении в нагретой части трубки проницаемого пористого вкладыша часть рабочего газа будет покидать трубку нагретым и ВКГ будет работать в режиме температурного разделения (подобно трубе Ранка-Хилша).

3. Рассмотрен колебательный цикл наполнения-опорожнения резонансной трубки и проведен анализ составляющих потерь холодопроизводительности в ВКГ-РТ высокого давления. Показано, что при расширении среды с большой величиной интегрального дроссель-эффекта невозможно отвести во внешнюю среду всю выделившуюся в приемном газе теплоту. Установлено, что доля исключенного из процесса энергопреобразования газа за один цикл составляет не менее 63 % от величины потока, поступающего в сопло. Таким образом, общая низкая эффективность процесса охлаждения в ВКГ-РТ определяется непрерывностью подачи газа из сопла в энергопреобразующую трубку. Показано, что этот недостаток может быть компенсирован в приведенной на рис. 3 конструкции, реализующей автоколебательный процесс сканирующей струи газа (Эффект Коанда).

4. Получены уравнения, связывающие геометрические размеры узла газораспределения (рис. 3) и режимные параметры расширяемого газа:

$$\left(\frac{4\pi}{Re_s}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{s_p}{b_0}} \Phi \left[\frac{b_{mp}}{s_p} \sqrt{\frac{Re_s}{8}} \right] = 1 \quad (3)$$

$$b_{mp} = \frac{s_p}{(n-1)} \arccos \left[\Phi \left(t_R \sqrt{2} \right) \right], \text{ где} \quad (4)$$

s_p – расстояние от среза сопла до рецепторов, b_{mp} – ширина рецепторов, Re_s – критерий Рейнольдса для турбулентной струи.

Показано, что в предположении постоянства плотности вдоль оси истекающей струи в газораспределительной камере, расстояние s_p и ширина рецепторов, приведенные к выходной ширине сопла, в основном определяются числом рецепторов и слабо зависят от степени понижения давления. Разработана методика расчета газораспределительной камеры пульсационного охладителя газа статического типа (ПОГ-СТ).

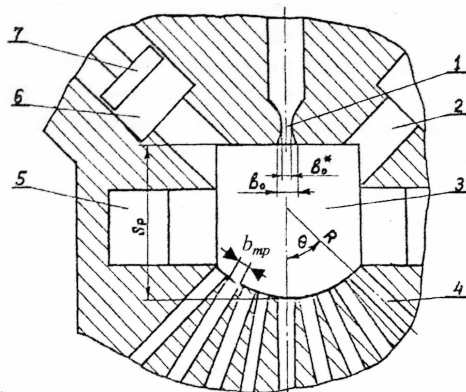


Рис. 3. Конструкция газораспределительной камеры аппарата ПОГ-СТ:
1- сопло, 2 и 6 – резонансные емкости, 3- газораспределительная камера, 4- резонансные трубки - рецепторы, 5- выпускные окна, 7- регулятор объема

Глава третья посвящена экспериментальному исследованию волновых криогенераторов различных типов. В качестве рабочего тела использовался воздух, фреоны, гелий. Исследована структура сверхзвуковых недорасширенных струй указанных газов в температурном диапазоне 300 ± 10 К. описаны экспериментальные стенды, исследуемые устройства и методики проведения опытов. Приведены конструкции разработанных волновых криогенераторов.

Для исследования структуры сверхзвуковых недорасширенных воздушных струй был создан экспериментальный стенд (рис. 4).

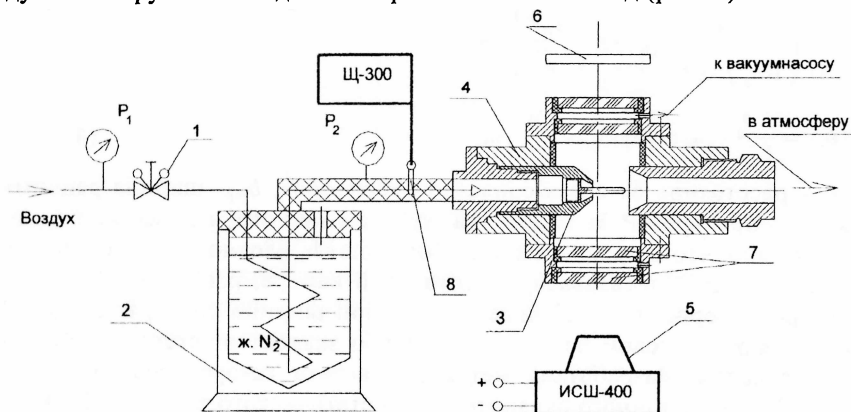


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для оптических исследований цилиндрических кольцевых струй

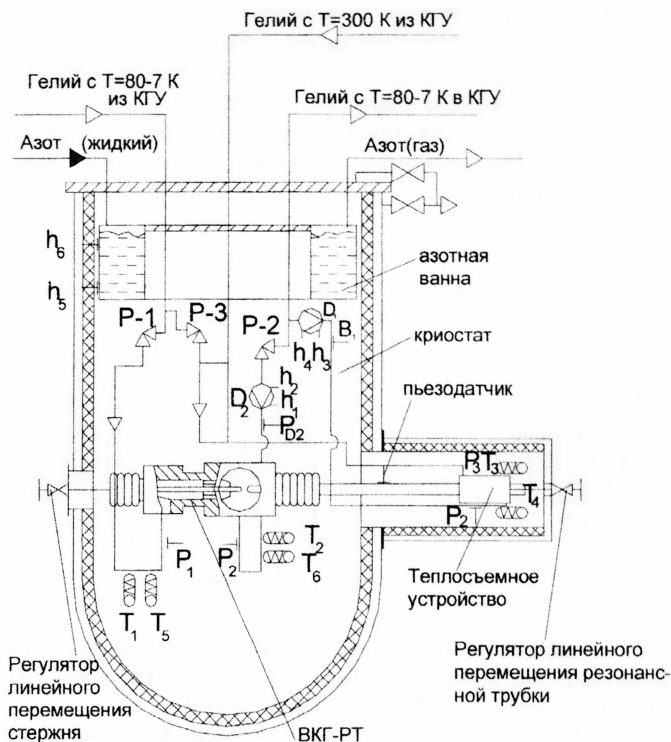


Рис. 5. Схема криогенного стенда для теневого фотографирования гелиевых недорасширенных струй

Сжатый и очищенный от влаги и углеводородов воздух через редуктор 1 проходил азотную ванну 2 (в случае исследования структуры кольцевой струи при температуре $T_{ex}=300\text{ K}$, в ванне отсутствовал жидкий азот), где охлаждался до температуры $200\div120\text{ K}$ и подавался в сопло 3 расширительного устройства 4. При увеличении перепада давлений в сопле 3 больше критического значения, в приемной камере возникал сложный неоднородный поток, имеющий бочкообразную структуру. Теневое изображение струи фиксировалось на пленке 6 (пленка ФТ-41), располагавшейся на расстоянии 50-100 мм от оси исследуемой сопловой системы. Источником света служила импульсная лампа ИСШ 400-5, создающая вспышки длительностью около 1 мксек, с дополнительной оптической системой 7, позволявшей получать плоский световой пучок с равномерным освещением в пределах рабочего участка. Температура газа перед соплом измерялась медь-константановой термопарой 8 толщиной 0,3 мм с точностью $\pm 1\text{ K}$ (вольтметр Щ-300).

Для исследования гелиевых кольцевых струй и тепловых испытаний гелиевых волновых криогенераторов был создан стенд (рис. 5), подключенный вакуумными трубопроводами к криогенной гелиевой установке КГУ 150/4,5. Стенд выполнен в криостате, с четырех сторон которого вмонтированы окна для визуализации процесса расширения газа и для регулирования линейного перемещения стержня внутри сопла и резонансной трубки. Внутри криостата смонтированы: азотная ванна с теплоотражающим экраном, волновой криогенератор, регулирующая и расходомерная аппаратура, датчики измерения температуры и колебаний давления газа. Из крышки криостата через гермовыводы выведены импульсные трубки измерения давления и расхода.

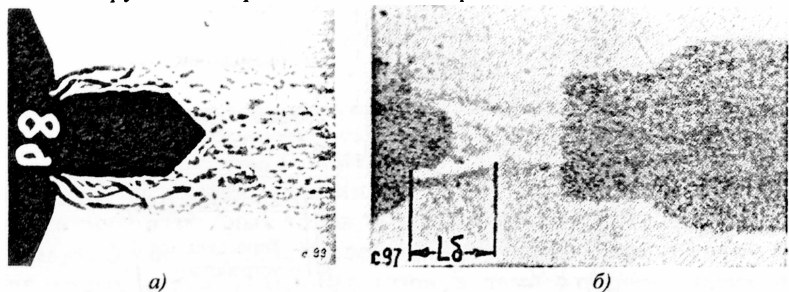


Рис. 6. Теневое изображение первой бочки сверхзвуковой недорасширенной кольцевой воздушной струи при $P_{вх}=0,8$ МПа и $T_{вх}=290$ К (а) и струи в гелиевом ВКГ-РТ при $P_{вх}=0,6$ МПа и $T=10$ К (б)

В связи с тем, что данные для сверхзвуковых кольцевых недорасширенных струй на уровне температур, $200 \div 120$ К при перепадах давления газа $P_{вх}/P_{вых}=3 \div 8$ отсутствуют, в этой части работы исследована структура сверхзвуковой недорасширенной кольцевой воздушной струи с параметрами: $T_{вх}=300$ К и $T_{вх}=200 \div 120$ К, $P_{вх}/P_{вых}=3 \div 8$.

Диапазон исследованных перепадов давления $P_{вх}/P_{вых}=3 \div 8$ полностью перекрывает область, в которой в настоящее время работают ВКГ низкого давления. На рис. 6. показано теневое изображение воздушной струи при $T=290$ К струи в гелиевом ВКГ-РТ при $T=10$ К, а на рис. 7 ее схема.

Результаты исследований показывают, что структура струи в основном зависит от перепада давлений $P_{вх}/P_{вых}$ и определяется при фиксированных диаметрах сопла D и стержня $d_{ст}$ углом конусности α .

В целом следует отметить, что сопоставление результатов исследования структуры сверхзвуковой недорасширенной кольцевой струи воздуха на уровне температур $T_{вх}=120 \div 200$ К с эмпирическими зависимостями Ю.Я. Борисова, по вычислению размеров бочки недорасширенной струи при комнатных температурах воздуха, показала согласование ре-

зультатов в пределах $\pm 15\%$. Впервые выполненные исследования гелиевых недорасширенных кольцевых струй показали, что при $T_{\text{вх}} = 10 \div 13$ К эффективная зона неустойчивости струи ($\Delta_{\text{н.в.}} - X_2$) наиболее выражена во второй ячейке струи. Поэтому при расположении среза резонатора в этой зоне наблюдается режим максимальной генерации волновой энергии, что имеет принципиальное значение при конструировании ВКГ.

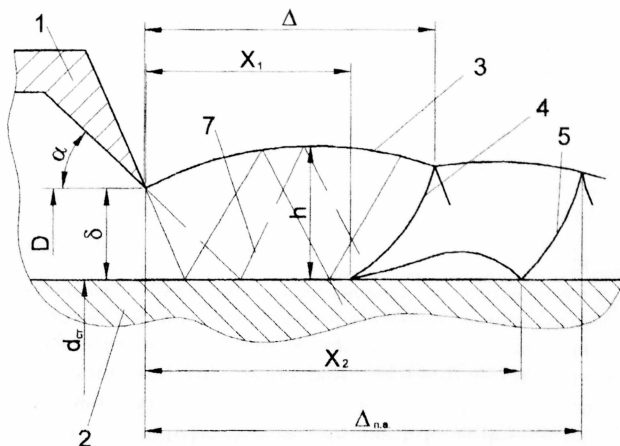


Рис. 7. Схема истечения сверхзвуковой газовой струи из сопла с осевым цилиндрическим стержнем: 1- сопло; 2- осевой стержень; 3- граница сверхзвуковой недорасширенной струи; 4- первый скачок уплотнения; 5- второй скачок уплотнения

Волновые криогенераторы не содержат движущихся частей и включают в себя два основных элемента – генератор волновой энергии, в котором осциллирующий скачок уплотнения преобразует энергию сжатого газа в энергию упругих колебаний среды, и устройство для преобразования этой волновой энергии в какой-либо другой вид энергии, вывод которой из системы был бы более всего доступен.

Одним из вариантов ВКГ (рис. 8) является конструкция с эллипсоидным концентратором, в одном фокусе которого происходит генерация упругих колебаний газовой среды (волн), а в другом - концентрация их и превращение в теплоту, снимаемую внешним теплоносителем при более высокой температуре. Газоструйный излучатель, расположенный в одном из фокусов концентратора, является первой ступенью преобразования энергии струи. Поэтому амплитуда и частота излучаемых акустических колебаний, а также суммарная волновая мощность излучателя являются важнейшими характеристиками криогенератора в целом, так как они определяют характеристики остальных элементов: адиабатной эллипсоидной рабочей камеры и поглотителя волновой энергии.

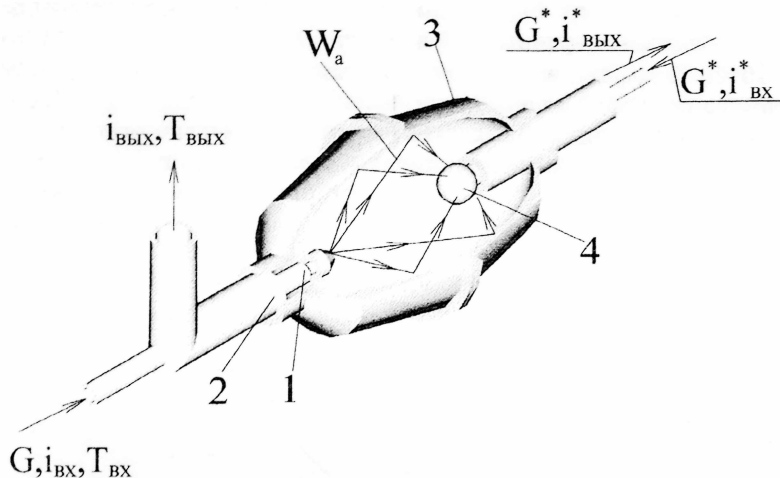


Рис. 8. Схема волнового криогенератора с эллипсоидной рабочей камерой:
 1- газоструйный излучатель, 2- сборник расширенного газа, 3- адиабатный эллипсоидный концентратор, 4- поглотитель волновой энергии (пористая медь)

Проведенные исследования показали, что основные элементы ВКГ эллипсоидного типа имеют относительно высокую эффективность: для газоструйного излучателя значение $\eta_a \approx 26\%$ (рис. 9), для эллипсоидного концентратора $\eta_k \approx 90\%$, для поглотителя волновой энергии $\eta_n \approx 87 - 90\%$. Это позволяет оценить интегральный адиабатный КПД эллипсоидного волнового криогенератора $\eta_s = \eta_a \eta_k \eta_n$ (по аналогии с детандером) значением, близким к 20 %:

Эллипсоидный концентратор работал и в режимах температурного разделения – в этом случае через нагретый пористый поглотитель волновой энергии (4, рис. 8) отводилась часть рабочего газа.

Эксперименты с эллипсоидным ВКГ на гелии при температуре 80 К показали, что при существующем уровне КПД газоструйных акустических излучателей адиабатный КПД криогенератора был равен 10-12 % с отводом теплоты на температурный уровень окружающей среды. При этом требовалась периодическая подстройка (регулировка) газоструйного излучателя в зависимости от температуры расширяемого газа, т.е. волновой криогенератор эллипсоидного типа требует дополнительной регулировки.

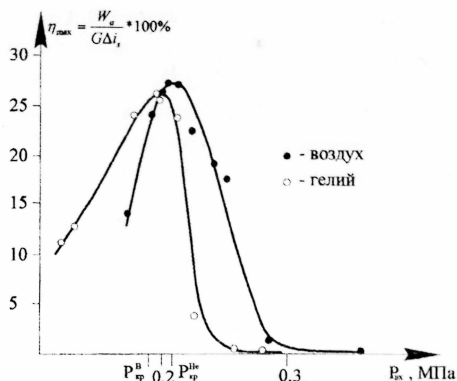


Рис. 9. Зависимость КПД излучателя от давления для гелия и воздуха

Другим вариантом ВКГ с концентрирующей камерой является криогенератор параболоидного типа, в состав которого входит параболоидная камера (рис. 10). Он работает следующим образом: сжатый газ поступает в газоструйный стержневой излучатель (ГСИ) 5, расположенный в фокусе параболоидного зеркала 4, расширяется в системе сопло-резонатор с образованием акустических колебаний. Излучаемые акустические колебания отражаются от параболоидного зеркала 4 и направляются в волновод 3, на противоположном конце которого установлен акустико-тепловой преобразователь (АТП) 2.

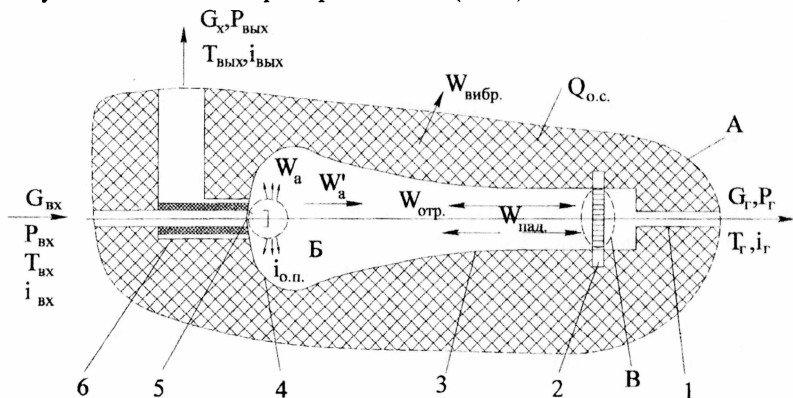


Рис. 10. Схема ВКГ параболоидного типа со сходящимся волноводом

Поток расширенного газа, выходящий из ГСИ 5, отводится из камеры через газовую ловушку 6. Акустические колебания, попадающие на поверхность АТП 2, поглощаются, и их энергия преобразуется в теплоту Q_m , которая отводится в режимах температурного разделения частью

расширенного газа через патрубок 1 (теплота Q_m может отводиться и внешним вспомогательным потоком).

Поглощенная теплота Q_m (см контур В) равна:

$$Q_m = \oint_{F_B} \left[\int_0^{\infty} I_v^B dv \right] dF, \quad (5)$$

где F_B —поверхность контура В; I_v^B —спектральное распределение интенсивности акустической волны по контуру В.

Интенсивность акустической волны $I_v = \frac{P_v^2}{\rho c}$, где

P_v —спектральное распределение акустического давления;

ρ —плотность; c —скорость звука.

Уровень звукового давления определяется соотношением:

$$L_p = \lg \left(\frac{P}{P_0} \right), \text{ где } P - \text{ акустическое давление; } P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} - \text{пороговое}$$

значение акустического давления.

После математических преобразований выражения (5) получено выражение для определения Q_m :

$$Q_m = \frac{8\pi}{\rho \cdot c} 10^{-10} \left[\int_0^{\infty} 10^{\frac{L_2(v,r)}{10}} dv \int_0^{R_{\eta}} r dr - \int_0^{\infty} 10^{\frac{L_3(v,r)}{10}} dv \int_0^{R_{\eta}} r dr \right], \quad (6)$$

где $L_2(v,r)$, $L_3(v,r)$ —соответственно, спектральное распределение уровня звукового давления до и за АТП.

Экспериментально исследовались две модели криогенератора параболоидного типа —с концентрирующим экспоненциальным и цилиндрическим волноводами. Вследствии дифракционных явлений на поверхности волновода и присутствия стоячей волны в камере КПД криогенератора не превышал $10 \div 12 \%$.

В итоге показано, что наиболее эффективными и простыми в эксплуатации являются волновые криогенераторы с одной или несколькими резонансными трубками. В работе подробно исследованы конструкции волновых криогенераторов с резонансной трубкой на воздухе низкого и высокого давления ($P_{ax} = 0,3 \div 20 \text{ МПа}$), на гелии в диапазоне параметров ($P_{ax} = 0,1 \div 1,0 \text{ МПа}$, $T_{ax} = 8 \div 20 \text{ К}$) и пульсационных охладителей газа на воздухе.

В результате проведенного исследования показано, что при работе волнового криогенератора на гелиевом уровне температур возможен от-

вод выделяемой в трубке-резонаторе теплоты на температурный уровень, превышающий температуру газа на входе в криогенератор в 2÷3 раза. При этом изоэнтروпный КПД волнового криогенератора понижается и составляет соответственно 80÷50 % от значения КПД, достигаемого при условии отвода теплоты на температурный уровень газа на входе в ВКГ. У разработанных и исследованных волновых криогенераторов получены изоэнтропные КПД: 9,5 % - для волнового криогенератора с резонансной трубкой низкого давления на воздухе; 8,5 % - для волнового криогенератора с резонансной трубкой на гелии при соотношении $T_c/T_{ax}=3$; 18 % - для пульсационного охладителя газа на воздухе высокого давления.

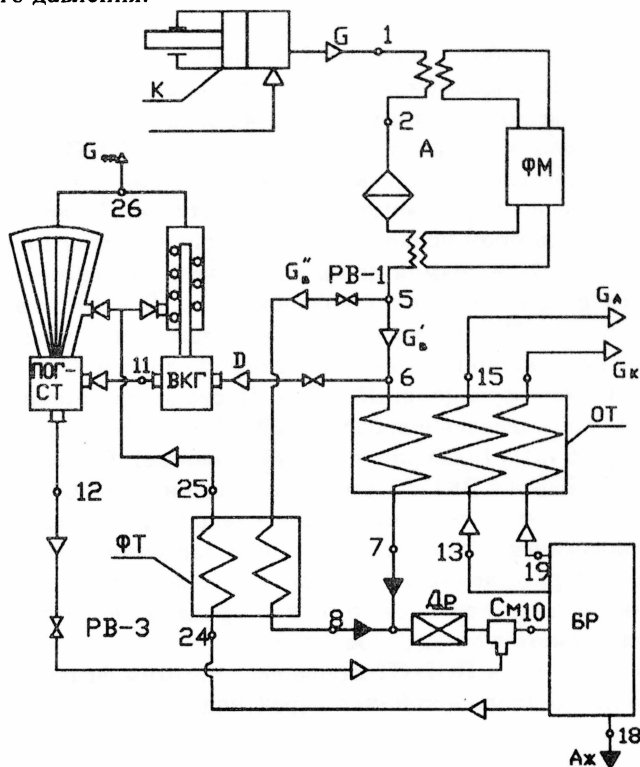
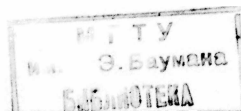


Рис. 11. Организация потоков в установке АК-0,135М с узлом волновых криогенераторов
 К – компрессор; ФМ – фреоновая машина; А – адсорбер; ФТ – фракционный т/о;
 ОТ – основной т/о; БР – блок разделения

В четвертой главе исследованы циклы и схемы низкотемпературных установок с использованием ВКГ. Приведены результаты промышленных испытаний ВКГ в составе воздухоразделительных и гелиевых уста-



новок, установок для получения чистой неон-гелиевой смеси и неона высокой чистоты. Определены области применения полученных результатов и созданных устройств.

В воздухоразделительных установках использование ВКГ наиболее целесообразно в циклах высокого давления. Ниже приводятся результаты опытно-промышленных испытаний ВРУ АК-0,135М с узлом волновых криогенераторов.

Базовая схема данной установки построена по дроссельному циклу высокого давления с предварительным охлаждением на уровне 280 К. Модернизация осуществлялась по схеме, приведенной на рис. 11. При этом, узел ВКГ компоновался в виде последовательно включенных ВКГ-РТ высокого давления и ПОГ-СТ среднего давления.

Опытно-промышленные испытания установки АК-0,135М с узлом ВКГ осуществлялись в комбинированном режиме с одновременным получением газообразного сжатого кислорода и жидкого азота.

Воздух сжимался в компрессоре K до давления 20 МПа, охлаждался в первом испарителе холодильной машины ΦM до температуры $+3...+5^{\circ}\text{C}$ и подавался в блок комплексной очистки A . После этого поток G_B охлаждался во втором испарителе холодильной машины и разделялся на три потока: G_B' – прямой поток в основной теплообменник, G_B'' – прямой поток во фракционный теплообменник, D – поток воздуха на расширение в узел ВКГ. Потoki G_B' и G_B'' охлаждались обратными потоками: G_K – продукционный поток сжатого кислорода, G_A – отбросной поток азота и $G_{\Phi P}$ – фракционный поток. После этого потоки G_B' и G_B'' смешивались и подавались в дроссельный вентиль D_p , где расширялись до давления 0,66 МПа (давление в нижней колонне). Поток D последовательно расширялся в ВКГ-РТ высокого давления и в ПОГ-СТ среднего давления, после чего подавался в смеситель CM . Из смесителя суммарный технологический поток воздуха при давлении около 0,65 МПа подавался в блок разделения BP , где осуществлялся процесс двукратной ректификации с получением сжатого кислорода G_K и потока жидкого азота $A_{ж}$, сливаемого в сосуд Дьюара.

Теплота от ВКГ-РТ и ПОГ-СТ отводилась потоком фракции $G_{\Phi P}$, после фракционного теплообменника перед подачей в циркуляционный контур регенерации адсорберов A . Регулирование соотношения потоков G_B' , G_B'' и D осуществлялось двумя вентилями $PB-1$ и $PB-2$ таким образом, чтобы температуры точек 7 и 8 были равными и минимальными по условию обеспечения работоспособности ОТ и ФТ. При заданной величине потока D промежуточное давление P_{II} устанавливается автоматически из условия равенства пропускной способности сопловых систем

устройств. Выходное давление в ПОГ-СТ устанавливалось регулирующим вентилем *РВ-3*.

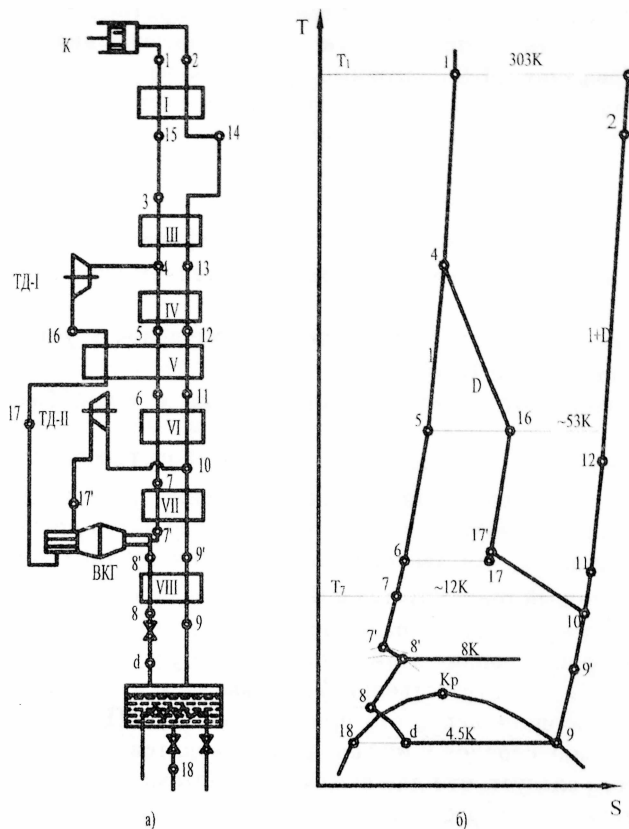


Рис. 12. Схема цикла установки КГУ-250/4,5 с ВКГ-РТ и его отображение в *T-S* диаграмме а- общая схема, б- цикл установки в *T-S* диаграмме; К- компрессор, ТД-I, ТД-2 – турбодетандер, I, III-VIII-теплообменники, II- азотная ванна, ВКГ- волновой криогенератор

Введение узла ВКГ позволило увеличить производительность установки по жидкому азоту с $6 \div 7$ кг/ч до 17,6 кг/ч (с одновременным получением сжатого кислорода) и повысить степень термодинамического совершенства установки с 12,5 до 15,6 %.

Актуальной задачей криогенной техники является повышение термодинамической эффективности уже эксплуатируемых гелиевых установок путем их модернизации, и вместе с тем, без увеличения их стоимости и уменьшения надежности. В этом разделе проведен термодинамический анализ цикла установки КГУ-250/4,5 в рефрижераторном режи-

ме с заменой первого дросселя волновым криогенератором с резонансной трубкой. Теплоту, выделяемую в трубке ВКГ-РТ, предлагается отводить потоком криоагента, идущего на расширение во второй детандер, т.е. “сбрасывать” в предыдущую ступень охлаждения. Схема цикла и его отображение в Т-S диаграмме приведены на рис. 12.

Энергетический баланс нижней ступени охлаждения КГУ с ВКГ будет выглядеть следующим образом:

$$(h_{10} - h_7) = q_0 + q_{7,8} - \Delta h_{\text{ВКГ}} \quad (8)$$

,где $(h_{10} - h_7)$ – изотермический дроссель-эффект на входе в нижнюю ступень за вычетом недорекуперации на теплом конце теплообменника VII;

$q_0 = h_9 - h_8$ – удельная холодопроизводительность установки на температурном уровне $T_0 = 4,5 \text{ К}$;

$q_{7,8}$ – теплоприток из окружающей среды к теплообменникам VII и VIII;

$\Delta h_{\text{ВКГ}} = h_7 - h_8$ – удельный теплоперепад в ВКГ-РТ.

Как видно из приведенного выше уравнения энергетического баланса, при тех же значениях q_0 и $q_{7,8}$, что и в случае чисто дроссельной ступени, величина $(h_{10} - h_7)$ уменьшается на величину того дополнительного холода, который генерируется в ВКГ. При заданной недорекуперации на входе в нижнюю ступень охлаждения ΔT_{7-10} , это приводит к повышению температурного уровня этой ступени T_7 . В результате повышения температуры T_7 и соответственно T_{10} повысятся и температуры гелия на входе в турбодетандеры, что при неизменных КПД, приводит к увеличению теплоперепадов и их холодопроизводительности.

Из этого следует, что для охлаждения потока газа, идущего в ступень окончательного охлаждения, и компенсации теплопритоков к детандерным ступеням q_{1-6} потребуется меньший поток газа, идущий на расширение в детандеры ТД-1 и ТД-2. Это видно из анализа уравнения энергетического баланса детандерных ступеней:

$$D = \frac{(h_{10} - h_7) - (h_2 - h_1) + q_{1-6} + \Delta h_{\text{ВКГ}}}{(h_2 - h_1) + \Delta h_{\text{ТД-1}} + \Delta h_{\text{ТД-2}} - q_{1-6}} \quad (9)$$

,где $(h_2 - h_1)$ – изотермический дроссель-эффект на входе верхней детандерной ступени за вычетом недорекуперации на теплом конце верхнего теплообменника;

q_{1-6} – удельный теплоприток к теплообменникам детандерных ступеней;

$\Delta h_{\text{ТД-1}} = (h_4 - h_{16})$ – удельный теплоперепад в первом турбодетандере;

$\Delta h_{\text{ТД-2}} = (h_{17} - h_{10})$ – удельный теплоперепад во втором турбодетандере;

В этом уравнении появление члена $\Delta h_{\text{ВКГ}}$ компенсирует уменьшение $(h_{10} - h_7)$, как следует из анализа баланса нижней ступени. Члены $(h_2 - h_1)$ и q_{1-6} не изменяются. Увеличение $\Delta h_{\text{ТД-1}}$ и $\Delta h_{\text{ТД-2}}$ приводит к уменьшению доли детандерного потока D . В совокупности с имеющим место при использовании ВКГ уменьшением температуры T_8 это обеспечивает увеличение полной холодопроизводительности установки.

Тепловые расчеты проводились с оптимизацией температуры и давления криоагента между детандерными ступенями с целью исключения их влияния на сравнительную оценку вариантов КГУ с дросселем и ВКГ-РТ. Замена первого дросселя в нижней ступени КГУ ВКГ-РТ с изотропным КПД $\eta_{\text{сВКГ}} = 10 \%$ и отводом выделяемой в нем теплоты потоком гелия, идущим на расширение во второй детандер, позволяет увеличить холодопроизводительность установки на 5 % при давлении в цикле $P_1 = 2,5$ МПа и повысить степень термодинамического совершенства установки с 12,9 % до 13,5 %. (Удельные затраты энергии уменьшаются с 500 до 489 Вт/Вт).

Наиболее весомый экономический эффект от применения волновых криогенераторов в наших работах достигается при повышении эффективности установок для получения чистой неоно-гелиевой смеси и неона высокой чистоты. Чистый неон получают путем ректификации при температурах близких к 30 К. Эти условия диктуют повышенные требования к степени подготовки неоно-гелиевой смеси на входе в ректификационную колонну. Суммарно содержание примесей в исходном продукте, как правило, не превышает 0,001 %. Такое качество способны обеспечить адсорбционные системы очистки, работающие на температурном уровне 68÷78 К. Для достижения минимального содержания примесей в Ne-Ne смеси, получаемой из различных источников, перед адсорбером устанавливается входной дефлегматор. Условия фазового равновесия в этом аппарате позволяют при рабочем давлении адсорберного блока (1,0 МПа) и температуре 66 К понизить концентрацию азота до 5 %. Дальнейшее выделение примесей ограничивается температурой заморозки азота в охлаждающей рубашке дефлегматора. Термическое сопротивление кристалла и газовой прослойки между твердым азотом и стенками аппарата препятствует отводу тепла и затрудняет конденсацию компонентов смеси.

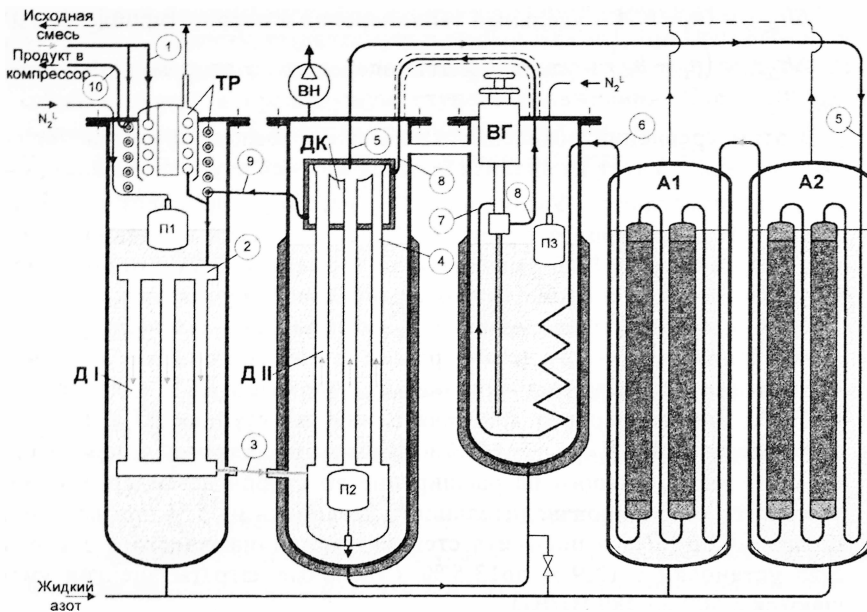


Рис. 13. Схема блока комплексной очистки N_2 -Ne-He смеси, включающего дополнительный сепаратор на базе волнового криогенератора

Другим фактором, ограничивающим достижение минимальных концентраций азота в смеси, являются снижение производительности используемых водокольцевых насосов при $P_{вс} < 0,2 \text{ атм}$. По этой причине в реальных условиях температуру кипения азота поддерживают на уровне $66\div 67 \text{ К}$. С учетом недорекупрации, температура N_2 -Ne-He смеси на выходе из дефлегматора составляет $69\text{--}70 \text{ К}$, что соответствует концентрации азота 5 % при рабочем давлении $P=1 \text{ МПа}$. С целью снижения концентрации примесей менее 5 % предложен и испытан способ дополнительной конденсации N_2 в очищаемой смеси перед адсорбером, использующий ВКГ-РТ. Криогенератор работает за счет перепада давлений между аппаратами (1 МПа) и всасывающей линией компрессора (0,1 МПа).

На рис. 13 представлена схема блока комплексной очистки N_2 -Ne-He смеси, включающего дополнительный сепаратор на базе волнового криогенератора. Установка состоит из пяти криостатов, размещенных в перлитном изоляционном кожухе (на схеме не показан). Первая ступень дефлегматора (Д I) и адсорберы окончательной очистки (А1 и А2) находятся при температуре азота, кипящего под атмосферным давлением. Три криостата, вмещающих названные аппараты, связаны жидкостными и паровыми азотными магистралями. Вторая ступень дефлегматора Д II

и блок волнового криогенератора ВКГ находятся при температуре $66\div 67\text{K}$ в ваннах с азотом, кипящим под вакуумом $0,2\text{ атa}$.

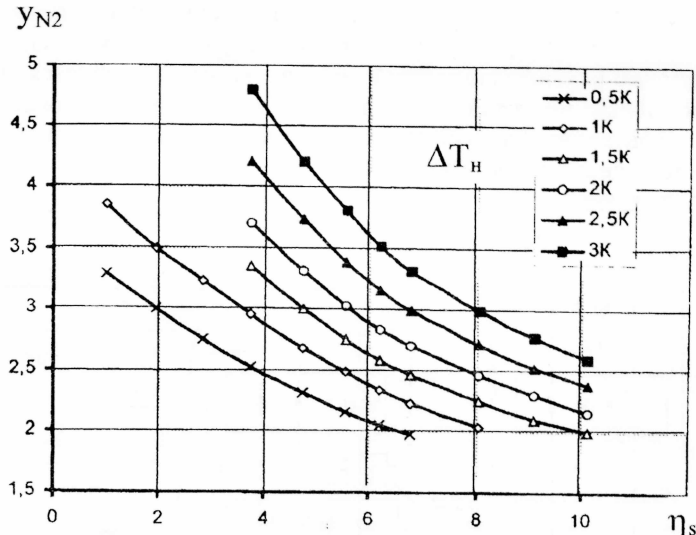


Рис. 14. Концентрация азота в неоне-гелиевой смеси (на выходе из дополнительного конденсатора) в зависимости от КПД волнового криогенератора и недорекупации в предварительном теплообменнике $\Delta T_n = T_1 - T_{N_2} = 0,5 \div 3\text{ K}$

После ДК смесь поступает в адсорберы, в которых при $T=78\text{ K}$ происходит очистка смеси от примесей. Концентрация продукта ($\text{Ne}+\text{He}$) на входе в волновой криогенератор (точка 7) равна $99,9992\%$. Остаточное количество примесей ($3\text{ ppm-H}_2\text{O}$, 1 ppm-H_2 и $4\text{ ppm N}_2+\text{O}_2$) приемлемо для очистки смеси в блоке ректификационного разделения при 30 K .

На рис. 14 показана зависимость концентрации азота в неоне-гелиевой смеси на выходе из дополнительного конденсатора от КПД волнового криогенератора и недорекупации в предварительном теплообменнике, которая менялась от $0,5\text{ K}$ до 3 K . Величина недорекупации в другом аппарате – дополнительном конденсаторе ДК была принята постоянной и равной $2,5\text{ K}$.

При уменьшении Y_{N_2} на входе в адсорберную ступень окончательной очистки увеличивается продолжительность рабочего цикла адсорбера. Благодаря сокращению числа переключений в единицу времени достигается положительный эффект, заключающийся в снижении потерь продукта и эксплуатационных затрат (жидкий азот, электроэнергия и др.). Применение волнового криогенератора при существующих объемах

производства чистой неона-гелиевой обеспечивает экономию 5 млн. руб в год.

Волновые криогенераторы так же были эффективно использованы в установках для получения чистого неона. В установках реализуется конденсационно-ректификационный метод, который является более предпочтительным по сравнению с другими методами и позволяет осуществлять производить непрерывное разделение смеси с получением высокочистого неона (99,999%).

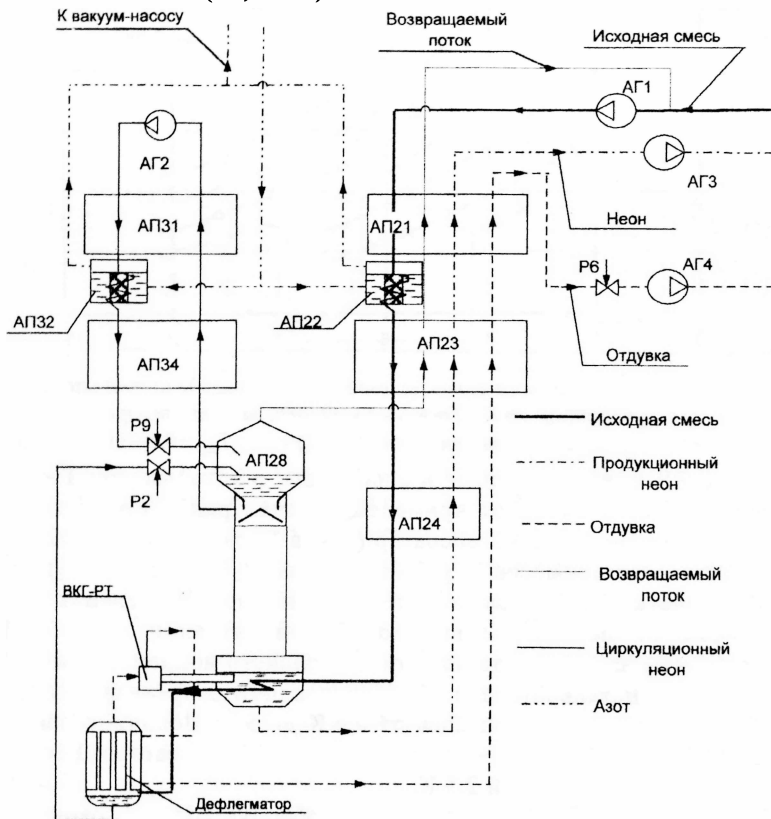


Рис. 15. Схема установки для получения неона высокой чистоты с использованием волнового криогенератора

Нами модернизирована промышленная установка получения неона высокой чистоты, которая эксплуатируется с 1995 г, рис. 15.

В базовой схеме “отдувочный поток” гелия выводится из установки с давлением 2,5 МПа. Осуществив расширение этого потока в волновом криогенераторе с резонансной трубкой до давления 0,1 МПа с отводом

от него энергии в куб колонны, холодный расширившийся поток гелия был использован для понижения температуры в дефлегматоре, который заменил пароотделитель.

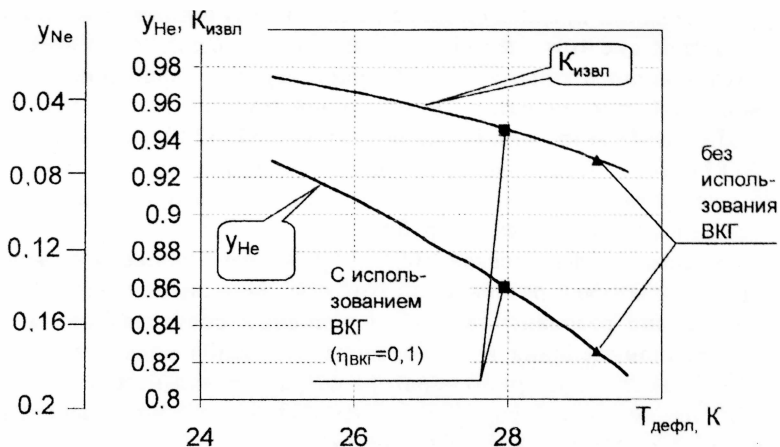


Рис. 16. Зависимость коэффициента извлечения неона и содержания гелия в "отдувочном" потоке от температуры смеси на выходе из дефлегматора

Количество дополнительно сконденсированного за счет применения ВКГ неона определяется как:

$$m_{Ne} = G_{ВКГ} \left(\frac{q_{ВКГ} - c_p \Delta T_n}{r_{Ne}} \right), \text{ где}$$

$G_{ВКГ}$ – расход газа через ВКГ; моль/с; $q_{ВКГ}$ – удельная холодопроизводительность ВКГ, Дж/моль; $c_p \Delta T_n$ – потери холода от недорекуперации и r_{Ne} – теплота конденсации неона, Дж/моль.

На рис. 16 приведена зависимость коэффициента извлечения неона и содержания гелия в отбросном потоке "отдувки" от температуры отбросного потока на выходе из дефлегматора. При снижении температуры с 29 К до 28 К концентрация неона в паровой фазе снизилась с 17 % до 15 %, что позволило повысить коэффициент извлечения неона с 93 % до 95 %. Это равносильно дополнительному производству неона с годовым экономическим эффектом ~10 млн. руб. в год.

Основные результаты и выводы:

1. Впервые показана возможность реализации процесса волнового расширения газа в криогенных установках с отводом энергии в ок-

ружающую среду либо на температурный уровень предыдущей степени охлаждения.

2. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложен новый способ получения холода и созданы реализующие этот способ новые аппараты – волновой криогенератор эллипсоидного типа, волновой криогенератор параболического типа, волновой криогенератор с резонансной трубкой (А.с. № 811396, пат. США №4483158, пат. Германии № DE 3134330 AI, пат. Франции № 8116941). Установлено, что наиболее эффективными и простыми в эксплуатации являются волновые криогенераторы с одной или несколькими резонансными трубками.
3. Предложена физическая модель рабочего процесса в волновом криогенераторе с резонансной трубкой. Дана оценка вклада в тепловой баланс резонансной трубки основных составляющих механизмов тепловыделения и теплоотвода. Проведён анализ зависимости адиабатного КПД криогенератора от ряда режимных и геометрических параметров. Сформулированы общие принципы расчёта и проектирования волновых криогенераторов.
4. Исследованы конструкции волновых криогенераторов с резонансной трубкой и пульсационных охладителей газа высокого давления на воздухе ($P_{вх}=10\div20$ МПа) и на гелии в диапазоне параметров ($P_{вх}=1\div0,3$ МПа, $T_{вх}=8\div20$ К). У исследованных криогенераторов получены изотропные КПД 9,5 %, 18 % и 8,5÷9 % соответственно, при отношении температуры отвода теплоты к температуре расширяемого газа равном трём.
5. Предложены и реализованы схемы воздухоразделительной и криогенной гелиевой установок с использованием волновых криогенераторов в качестве расширительных устройств. Предложена и реализована схема блока комплексной очистки неона-гелиево-азотной смеси с дополнительным сепаратором азота на базе волнового криогенератора с резонансной трубкой, работающего при температуре 66 К. Проведены промышленные испытания блока комплексной очистки смеси.
6. Создана неоновая криогенная установка для получения неона высокой чистоты, реализующая конденсационный метод разделения неона-гелиевой смеси, с использованием волнового криогенератора с резонансной трубкой в качестве расширительного устройства на выходе из пароотделителя отбросного потока гелия. Показано, что благодаря этому температура смеси в пароотделителе понижается с 29 К до 28 К и концентрация неона в паровой фазе уменьшается с 17 % до

15 %, Это позволяет повысить коэффициент извлечения неона с 93 % до 95 %.

- Показано, что замена процессов дросселирования процессом волнового расширения газа в установках очистки и разделения неон-гелиевой смеси обеспечивает экономический эффект ~ 15 млн. руб/год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

- Бондаренко В.Л., Мельников В.Д., Цепинь А.М. Акустический излучатель как холодопроизводящее устройство холодильных систем //Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тезисы докл. Всесоюз. конф.-М., 1980.- С. 5.
- Эффект охлаждения при волновом адиабатном расширении газа /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.Т. Десятов, В.Г. Пронько //Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- М., 1981.- С. 139-142.
- Архаров А.М., Пронько В.Г., Бондаренко В.Л. О расширении газового потока с генерацией волновой энергии в резонансных трубках и тепловых сепараторах //Криогенное и вакуумное машиностроение: Экспресс-информация ЦИНТИХимнефтемаш. Серия ХМ-6.-1982.- № 1.-С. 1-11.
- Исследование эффекта охлаждения при расширении газового потока в акустическом генераторе /А.М. Архаров, В.Г. Пронько, В.Л. Бондаренко и др. //Труды МВТУ.-1982.- № 381.- С. 86-97.
- Волновые преобразователи энергии как тепловые насосы /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Р.С. Мухамедов и др. //Тезисы докл. III Всесоюзной науч.-техн. конф. по холодильному машиностроению.- М., 1982.- С. 143.
- Cooling effect at wave expansion of gas stream /А.М. Arkharov, V.G. Pronko, V.L. Bondarenko et al //Proceedings of the XVI International Congress of Refrigeration.- Paris, 1983.- V. 1.- P. 189-194.
- Экспериментальное исследование волновых криогенераторов /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.И. Липа и др. //Криогенная техника и кондиционирование. Исследование и совершенствование процессов и аппаратов: Межвуз. сб. научн. тр.- Л.:ЛТИХП, 1984.- С. 23-29.
- Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Липа В.И. Волновые генераторы и их применение для повышения эффективности криогенных установок //Труды МВТУ.- 1984.- № 430.- С. 37-46.
- Cooling effect at wave expansion of gas stream /А.М. Arkharov, V.G. Pronko, V.L. Bondarenko et al //Cryogenics.- 1984.- V. 24.- P. 697-701.
- Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Мухамедов Р.С. Анализ эффективности волнового расширения хладагента в схеме с одноступенчатым

поршневым компрессором //Изв. ВУЗов. Машиностроение.- 1985.- № 2.- С. 61-65.

11. Эффект охлаждения при волновом адиабатном расширении газа /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Р.С. Мухамедов, В.В. Плужник //Докл. АН УзССР.- 1985.- №6.- С. 30-32.

12. Wave Expansion of air and helium at low temperatures: investigation /А.М. Arkharov, V.L. Bondarenko, V.I. Lipa et al. //Cryoprague-86: International cryogenic conference :Preprints IIR. Commission A1/2.- Prague, 1986.-P.1-3.

13. Исследование рабочих процессов в волновом криогенераторе с резонансной трубкой /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Р.С. Мухамедов, и др. //Труды МВТУ.- 1986.- №460.- С. 39-45.

14. Исследование опытного газодинамического криогенератора /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, И.А. Гольман, и др. //Химическое и нефтяное машиностроение.-1986.- №12.- С. 3-5.

15. Исследование опытного газодинамического генератора холода с различными видами резонансных трубок /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.Д. Гуторов и др. //Сборник научных трудов НПО «Криогенмаш».- Балашиха, 1986.- С.5.

16. Экспериментальное исследование газодинамического криогенератора /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.Д. Гуторов и др. //Химическое и нефтяное машиностроение.-1987.-№11.-С 47-51.

17. Development of the cold generation methods without movable parts at all /А.М. Arkharov, V.L. Bondarenko, Yu. Ya. Borisov et al. //Proceedings of the XVII International Congress of Refrigeration (Commission A1/A3).- Wien (Austria), 1987.- P. 64-71.

18. Исследование волнового криогенератора параболоидного типа /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.А. Голубев, М.Ю. Савинов //Труды МВТУ.-1988.- № 522.- С. 3-12.

19. Экспериментальное исследование путей повышения эффективности волнового криогенератора с резонансной трубкой /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.И. Липа, Н.П. Лосяков //Изв. ВУЗов. Машиностроение.-1988.- № 8.- С. 64-68.

20. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Плужник В.В. Экспериментальное исследование гелиевого волнового криогенератора с резонансной трубкой при низких температурах //Изв. ВУЗов. Машиностроение.- 1988.- № 7.- С. 79-82.

21. Kabada P.V., Bondarenko V.L., Arkharov A.M. Experimental Investigation of Thermal Characteristics of the Hartmann-Sprenger Tube //Progress in the Design and Construction of Refrigeration Systems: Proceedings of meetings com. B1,B2,E1,E2 /International Institute of Refrigeration (IIR)

Conference.- Purdue (USA), 1988.-Р. 27-32.

22. Перспективы повышения экономичности криогенных воздухо-разделительных установок высокого давления на базе волновых криогенаторов /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, М.Ю. Савинов, М.Ю. Колпаков //Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана.- 1989.- №534.- С. 17-44.

23. Экспериментальное исследование гелиевого волнового криогенатора с резонансной трубкой в криогенных условиях /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.И. Липа, Н.П. Лосяков //Труды МГТУ.- 1989.- № 533.- С. 63-75.

24. Kabada P.V., Bondarenko V.L., Arkharov A.M. Thermal characteristics of a Hartmann-Sprenger Tube //International Journal of Refrigeration.- 1990.- V.13.- P. 309-316.

25. Разработка инженерной методики расчета газораспределительной камеры пульсационного охладителя газа статического типа (ПОГ-СТ) /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, М.Ю. Савинов, М.Ю. Колпаков //Труды МГТУ.-1991.- № 554.- С. 46-55.

26. Экспериментальное исследование гелиевого волнового криогенатора с резонансной трубкой на уровне температур 10.. 290 К /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.И. Липа и др. //Труды МГТУ.-1991.- № 554.- С. 22-43.

27. New methods of cold generation and its application to air separation /A.M. Arkharov, V.L. Bondarenko, V.I. Lipa et al //Cryogenic Process and Machinery. AIChE Symposium series (N.Y.).-1993.- Vol. 89, N 294.-P. 57-60.

28. Архаров И.А., Бондаренко В.Л., Шадрина В.Ю. Получение неона высокой чистоты методом десублимации// Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1995.-№ 2.-С. 16-19.

29. Методика расчета газораспределительной камеры пульсационно-го охлаждения газостатического типа /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, М.Ю. Савинов, М.Ю. Колпаков //Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1996.- Специальный выпуск Криогенная и холодильная техника. Криомедицина.- С. 62-66.

30. Многофункциональная система криогенного обеспечения на основе криогенной газовой машины /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко и др. //Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1996.- Специальный выпуск "Криогенная и холодильная техника. Криомедицина".- С. 74-78.

31. Опыт эксплуатации установки для получения неона высокой чистоты /В.Л. Бондаренко, М.Ю. Савинов, А.А. Голубев и др. //Вестник МГТУ. Машиностроение.-1996.- Специальный выпуск "Криогенная и холодильная техника. Криомедицина".- С. 79-83.

32. Пути повышения коэффициента извлечения неона при разделении неона-гелиевой смеси. /А.М. Архаров А.М., В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др. //Вестник МГТУ им. Баумана. Машиностроение.- 1998.- Спец. выпуск. «Криогенная и холодильная техника».- С.44-53.

33. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М. Дроссельный цикл на неона-гелиевой смеси в установке для разделения инертных газов //Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1998.- Спец. выпуск "Криогенная и холодильная техника".-С. 53-61.

34. Research-industrial plant for production of high purity neon /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko et al //Cryogenics '98: Proceedings of the Fifth International Conference.- Prague, 1998.- P. 68-69.

35. Research-industrial plant for production of high purity neon /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko et al //Proceedings of 17th International Cryogenic Conference.- Bournemouth (UK), 1998.- P. 735-737.

36. Бондаренко В.Л., Вигуржинская С.Ю. Оптимизация системы предварительной очистки неона-гелиевой смеси //Холодильная техника і технологія (Одеса).- 1999.- Вып. 63.-С. 86-91.

37. Исследование процесса разделения смеси Ne-He на мембране из кварцевого стекла /А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Л. Бондаренко и др. //Химическое и нефтегазовое машиностроение.- 1999.- №5.- С. 13-15.

38. Поколение новой техники для криогенного производства неона и гелия высокой чистоты /А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Л. Бондаренко и др. //Холодильная техника і технологія.- Одеса, 1999.- Вып.62.-С. 88-101.

39. Research-industrial plant for high purity neon production /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko et al //Proceedings of the XX International Congress of Refrigeration.- Sydney (Australia), 1999.- P. 186-195.

40. Новая техника для получения неона и гелия высокой чистоты с использованием криогенной технологии /А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Л. Бондаренко и др. //Холодильная техника.- 2000.- №5.- С. 2-5.

41. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Пуртов С.Н. Рефрижераторные циклы на неоне и неона-гелиевой смеси для криостатирования высокотемпературных сверхпроводящих устройств / Вестник МГТУ им. Баумана. Машиностроение.- 2000.- Спец. выпуск "Криогенная и холодильная техника".- С. 50-58.

42. Neon-helium mixtures separation by adsorption and freezing /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko et al //Proceedings of the 12th Intersociety Cryogenic Symposium, AIChE 2000 Spring Meeting.- Atlanta (USA), 2000.- P.71-79.

43. Optimisation of the system for neon-helium mixture purification /A.M. Arkharov, V.L. Bondarenko, Yu.M. Simonenko, S.Yu. Vigurginskaya //Cryogenics 2000: Proceedings of the Sixth International Conference.- Prague, 2000.- P. 169-173.

44. High purity helium extraction from the waste flow of pure neon production /I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko, A.V. Kosova, S.N. Purtov //Cryogenics 2000: Proceedings of the Sixth International Conference.- Prague, 2000.- P. 174-176.

45. Arkharov I.A., Bondarenko V.L., Mikhailov A.V. Neon extraction from neon-helium mixture by membrane method: analytical and experimental results //Cryogenics 2000: Proceedings of the Sixth International Conference.- Prague, 2000.- P. 117-121.

46. Bondarenko V.L., Rura V.N. Increasing of the efficiency of the plant that produces high purity neon //Cryogenics 2000: Proceedings of the Sixth International Conference.- Prague, 2000.- P. 162-168.

47. New Ne-He purification plant: theoretical and experimental tests. /I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko, A.V. Kosova et al // Cryogenics 2002: Proceedings of the 7th International conference.- Prague, 2002.- P. 99-102

48. Wave cryogenerators in the Ne-He mixture purifying systems /V.L. Bondarenko, A.M. Arkharov, M.Yu. Savinov et al //Cryogenics'2002: Proceedings of the 7th International conference.- Prague, 2002.- P.103-107.

49. Архаров И.А., Бондаренко В.Л., Михайлов А.В. Получение неона из неона-гелиевой смеси на мембране из кварцевого стекла //Химическое и нефтегазовое машиностроение.- 2002.- №5.- С. 32-33.

50. А.с. № 811396 (СССР) Дроссельное устройство для получения холода /А.М. Архаров, А.Т. Десятов, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др.- 1979.- д.с.п.

51. А.с. № 1079972 (СССР) Устройство для получения тепла и холода/А.М. Архаров, В.П. Беляков, В.Л. Бондаренко, Н.В. Филин и др. //БИ.- 1984.- № 10.

52. А.с. 1086316 (СССР) Газовая холодильная машина /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др. //БИ.- 1984.- № 3

53. А.с. 1086318 (СССР) Криогенная установка/А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др. //БИ.- 1984.- № 12

54. А.с. 1086319. (СССР) Расширительное устройство для получения холода /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др. //БИ.- 1984.- № 14

55. А.с. 1116808. (СССР) Криогенная установка. /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Б.И. Волинский и др.- 1982.- д.с.п.

56. А.с. № 1260647 (СССР) Способ получения холода /А.М. Архаров, А.Т. Десятов, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др. //БИ.- 1986.- № 36

57. А.с. №1341471 (СССР) Устройство для получения тепла и холода.
58. А.с. № 1368590 (СССР) Расширительное устройство для получения холода /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.А. Голубев, М.Ю. Савинов, Н.В. Филин. // БИ.-1988.- № 3
59. А.с. № 1378529 (СССР) Расширительное устройство для получения холода /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, И.А. Гольман, М.Ю. Савинов, Н.В. Филин и др. - 1987. д.с.п.
60. А.с. 1433144 (СССР) Газоструйный стержневой излучатель /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Ю.Я. Борисов и др. - 1988.- д.с.п.
61. А.с. 1506997 (СССР) Установка для получения тепла и холода /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, В.Г. Пронько и др. //БИ.- 1988.- № 14
62. А.с. № 1543641 (СССР) Газоструйный стержневой излучатель /А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Ю.Я. Борисов и др. - 1989.- д.с.п.
63. Pat. 4483158 (USA) Method of cold generation and a plant for accomplishing same /A.M. Arkharov, A.T. Desyatov, V.L. Bondarenko, V.G. Pronko ets., 1984.
64. Pat. 8116941 (France) Procède de production de froid et installation pour sa mise en auvre /A.M. Arkharov, A.T. Desyatov, V.L. Bondarenko ets., 1981.
65. Pat. 2083601 (Great Britain) A method and plant for refrigeration /A.M. Arkharov, A.T. Desyatov, V.L. Bondarenko ets., 1985.
66. Pat. 4444019 (USA) Method of cold generation and a plant for accomplishing same /A.M. Arkharov, A.T. Desyatov, V.L. Bondarenko, V.G. Pronko ets., 1984.
67. Пат. 77861/1982 Япония, МКИЗ F25B 9/00 Способ производства холода и установка для его осуществления /А.М. Архаров, А.Т. Десятов, В.Л. Бондаренко и др. // Официальный патентный бюллетень Японии «Тохи-Кохо» от 15 мая 1982 г., №7781/1982
68. Пат. DE 3134330 AI (Германия) Способ производства холода и установка для его осуществления / А.М. Архаров, А.Т. Десятов, В.Л. Бондаренко и др. //Offen legugsschift DE 3134330 AI 16.06.82.
69. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальностям «Техника и физика низких температур» и «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование»: В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем /А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Л. Бондаренко и др.; Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина.- М.:Машиностроение, 1999.- 720 с.
70. Cryogenic Systems Vol. 2: Design of Apparatus, plants, systems /A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, V.L. Bondarenko et al. – Bauman MSTU Press, 2001.- 639 p.

Подписано к печати 26.02.03г.
Зак 36т. Объем 2,25 пл. тир 100
Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана
107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5