

УДК 621.565:621.59

**В.Л. Бондаренко**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, факультет «Энергомашиностроение», Лефортовская набережная, 1, г. Москва, РФ, 105005

*e-mail: nadia@iceblick.com*

**Н.П. Лосяков**

ООО «Айсблик», ул. Пастера, 29, г. Одесса, Украина, 65026

*e-mail: lnp@te.net.ua*

**Ю.М. Симоненко**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65026

*e-mail: ysim1@yandex.ru*

## ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ И ПУЛЬСАЦИОННЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ ГАЗОВ

*Безмашинные аппараты занимают особое место среди охладителей, использующих энергию сжатого газа. Они уступают детандерам по эффективности, но обладают рядом неоспоримых эксплуатационных и конструктивных преимуществ. Среди них — высокая надёжность, многофункциональность, безынерционность, компактность, простота изготовления. Эти особенности обусловили распространение безмашинных устройств в самых различных сферах: от вакуумной техники и медицины до криогеники. В работе отмечены общие физические признаки вихревых и волновых аппаратов. Рассмотрены схемы установок, в которых используются сепараторы и охладители. Обоснована перспективность использования газодинамических аппаратов в технологиях получения редких газов.*

**Ключевые слова:** Вихревая труба. Волновой криогенератор. Резонансная камера. Центробежный ректификатор. Воздухоразделительная установка. Гелиевый ожигитель. Неонгелиевая смесь.

*V.L. Bondarenko, N.P. Losyakov, Yu.M. Simonenko*

## INDUSTRIAL APPLICATION OF VORTICAL AND PULSATING CHILLERS IN EXTRACTION TECHNOLOGIES OF RARE GASES

*Machine-free devices take the special place among chillers which use energy of compressed gas. They yield to expanders on efficiency, but have combination of conclusive operational and design advantages. Among them — high reliability, multifunctionality, noninertiality, compactness, simplicity of manufacturing. These features have stipulated distribution of machine-free devices in the most different fields: from vacuum engineering and medicine up to cryogenics. The general physical characteristics of vortical and wave devices, the schemes of plants in which separators and chillers using are examined. The advanced of used of gas-dynamic devices in technologies for receipt of rare gases are valid.*

**Keywords:** Vortical tube. Wave cryogenerator. Resonance chamber. Centrifugal rectifier. Air separation plant. Helium liquifier. Neon-helium mixture.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В газодинамических аппаратах энергия сжатого газа трансформируется в тепловую, отводимую во внешнюю среду частично через стенки аппарата или в виде истекающего газа. При этом происходит понижение температуры основного потока на выходе из устройства.

Первые образцы подобных охладителей появились относительно недавно. Вслед за работами Ж.

Ранка и Р. Хилша [1,2] закономерности вихревого эффекта были изучены и отражены в трудах М.Г. Дубинского, В.С. Мартыновского и В.М. Бродянского [3-5].

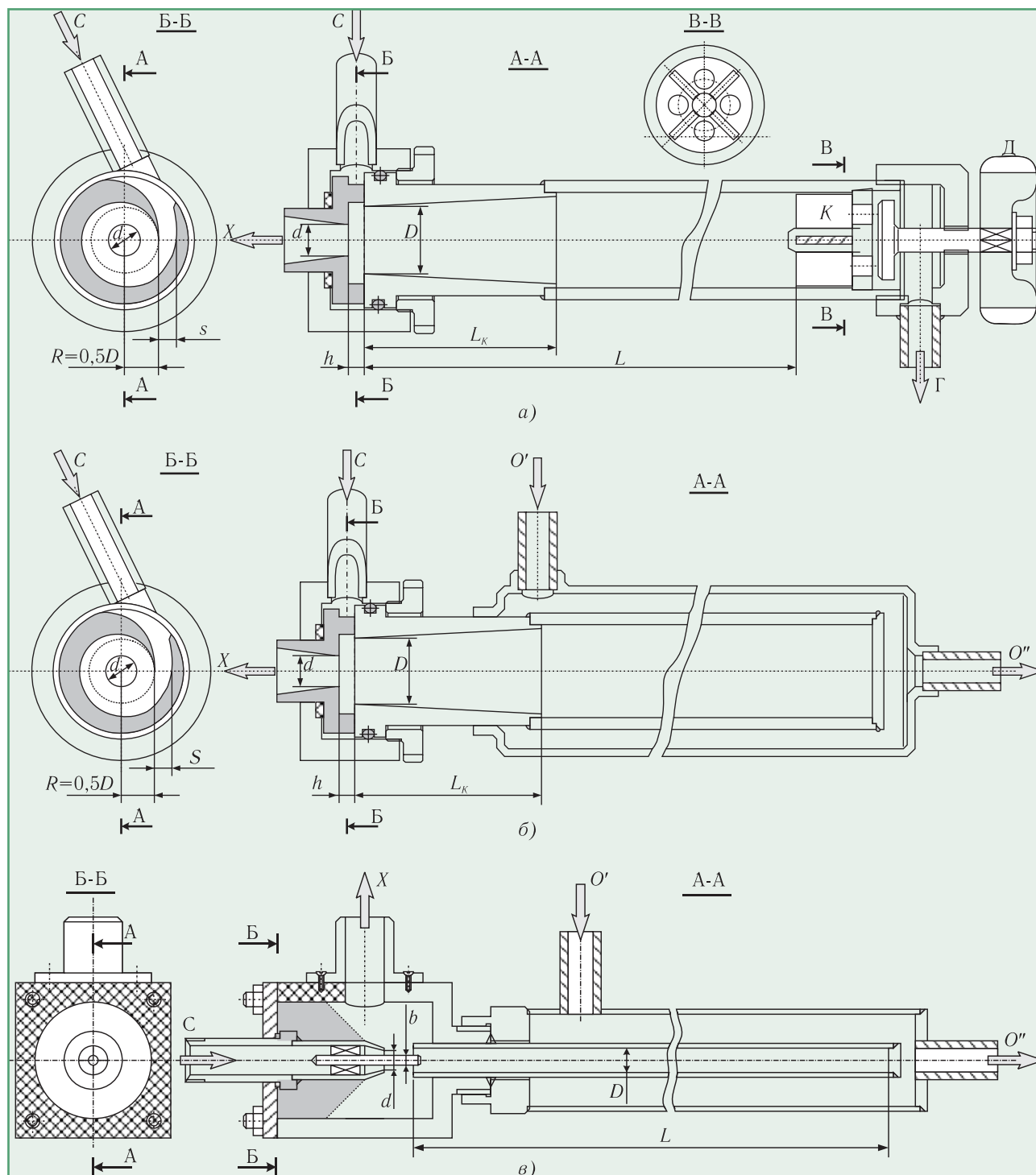
Наряду с развитием вихревой техники, создавались и другие системы безмашинного охлаждения. Так, в 50-ых годах из работ Г. Шпренгера и его последователей стало известно о другом типе газодинамического охладителя — резонансной трубке [6].

Исследования природы энергоразделения в пуль-

сирующем столбе газа были проведены в МВТУ им. Н.Э. Баумана под научным руководством А.М. Архарова [7]. Там же А.Д. Сусловым детально изучены холодопроизводящие процессы в пульсационных аппаратах с регенераторами [8]. В них температура рабочего тела понижается в процессе внутреннего адиабатного расширения при периодическом выхлопе газа из постоянного объёма.

Проведённые теоретические и эксперименталь-

ные исследования позволили выявить оптимальные размеры проточной части газодинамических охлаждающих устройств. Были созданы первые промышленные образцы, используемые для целей технологического кондиционирования и в других сферах холодильной техники. В настоящее время безмашинные аппараты применяются в теплозащитных костюмах, при ремонте энергообъектов, в газовой промышленности и на транспорте.



**Рис. 1.** Классические конструкции газодинамических генераторов холода: а — неохлаждаемая (адиабатная) вихревая труба с выпуском горячего потока; б — вихревая труба с охлаждающей рубашкой камеры энергоразделения; в — резонансный охладитель со звуковым источником колебаний; С — сжатый газ; X — холодный поток; Г — горячий поток; O' и O'' — вход и выход охлаждающей среды; К — крестовина; Д — дроссель горячего потока

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОБЩИЕ ПРИЗНАКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Среди множества холодопроизводящих процессов вихревые и волновые преобразователи энергии занимают особое место. Они сочетают в себе важные эксплуатационные преимущества: полное отсутствие подвижных деталей, малую инерционность, экологическую безопасность, малую одновременность производства холода и тепла, а также создания разрежения. Диапазон температур, при которых используются безмашинные энергоделители, весьма широк: от низкотемпературных ступеней гелиевых ожижителей [9] до воспламенителей топлива в реактивных двигателях (+700 °С) [10]. Известны специальные вихревые аппараты, способные генерировать низкочастотные колебания давления и звуковые волны [11] и извлекать жидкие (твёрдые) фракции из смеси веществ [12–14]. Универсальность, надёжность и долговечность газодинамических аппаратов позволяют прогнозировать растущую роль этих устройств в новейших технологиях XXI-го века.

В зависимости от решаемых задач и сфер применения создано множество разновидностей газодинамических аппаратов [15,16]. На рис. 1 показаны некоторые характерные типы таких охладителей.

В вихревых трубах (см. рисунки 1,а и 1,б) сжатая среда подаётся через тангенциальный сопловой ввод С в камеру энергоделения. Расширяясь, газ образует высокоскоростной поток и разделяется на холодную с температурой  $T_x < T_{oc}$  и нагретую с температурой  $T_t > T_{oc}$  составляющие, где  $T_{oc}$  — температура окружающей среды. Охлаждённый поток формируется в осевой зоне камеры и выходит из вихревой трубы через отверстие диафрагмы, расположенной вблизи соплового сечения С. Нагретый поток образуется в периферийной зоне камеры и движется вдоль её стенки в направлении, обратном направлению движения охлаждённого потока. Горячий газ выходит из вихревой трубы через дроссельный клапан Д (см. рис. 1,а). При изменении степени открытия клапана варьируются расходы и температуры охлаждённого и нагретого потоков. В случае достаточно большой площади проходного сечения клапана Д вихревая труба может перейти в режим работы эжектора, всасывая внутрь камеры окружающий воздух через отверстие диафрагмы ( $G_t > G_{oc}$ ). Полное закрытие клапана приводит к выходу через диафрагму всего газа, поступающего в вихревую трубу ( $G_{oc} = G_x$ ,  $G_t = 0$ ), практически без изменения его температуры. Для обеспечения перепада температур в таком режиме вихревая труба нуждается в отводе тепла через стенки камеры (рис. 1,б). С этой целью используют охлаждающую рубашку или эффективное оребрение [17].

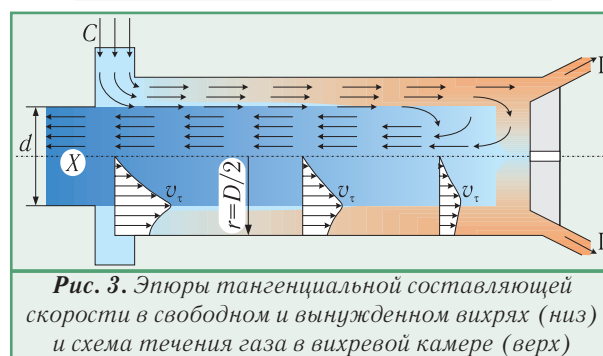
Несмотря на очевидные технические отличия, вихревые и волновые устройства имеют ряд общих физических признаков. Механизм температурного разделения в вихревых камерах сопровождается перераспределением энергии между вращающимися слоями газа. Первые исследования структуры закрученно-

го потока показали, что характер радиального распределения окружной скорости в приосевой и периферийной зонах вихря неодинаков. В центральной части окружная скорость  $v_t$  увеличивается в направлении от оси к стенке камеры пропорционально радиусу  $r$ . Такой закон изменения  $v_t$  характерен для вращения частей твёрдого тела с постоянной угловой скоростью

$$\omega = v_t / r = \text{const.} \quad (1)$$

В периферийной области изменение окружной скорости подчиняется закону потенциального течения с постоянной циркуляцией по радиусу  $r$ . В этой зоне (рис. 2,а)  $v_t$  наоборот увеличивается в направлении от стенки к оси согласно условию:

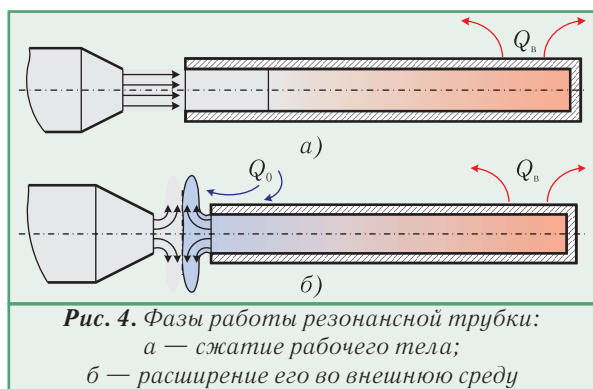
$$v_t r = \text{const.} \quad (2)$$



На рис. 3 показано характерное изменение окружной скорости по радиусу вихревой трубы для сечений, расположенных на различных расстояниях от плоскости диафрагмы. По мере движения газа вдоль камеры окружная скорость и радиальный градиент статического давления уменьшаются. Постепенно свободный вихрь начинает распространяться к оси, передавая часть кинетической энергии вращения к осевому потоку. В соответствии с гипотезой А.П. Меркулова [18] в процессе перехода в приосевую область элементы газа интенсивно турбулизуются. Происходит интенсивный перенос тепла и массы в условиях радиального перепада статического давления. При перемещении элемента газа с одной позиции на другую он адиабатно расширяется (или сжимается) в поле с высоким радиальным градиентом давления. Соответственно меняется и его температура. Если после этого температура микрообъёма окажется отличной от температуры расположенных на этом ради-

усе других элементов, то в результате смешивания произойдет нагрев (охлаждение) газа в этом слое. В сущности, элементы газовой среды совершают процессы охлаждения, передавая тепло в периферийные слои, с использованием в качестве источника механической энергии турбулентных пульсаций давления. Для усиления колебаний давления в вихревых камерах иногда применяют специальные средства [19].

Работа волновых (резонансных) охладителей также основана на термической неравномерности в пульсирующем слое газа. В соответствии с [7] цикл в резонансной трубке условно разделяется на две фазы (рис. 4). В первой фазе (а) струя входит в трубку и сжимает находящийся в ней газ. Во второй (б) — происходит расширение рабочего тела во внешнее пространство. При этом наблюдается отклонение струи газа на выходе из сопла в поперечном направлении. Происходит, образно говоря, «накачка» тепловой энергией удалённого от соплового сечения торца резонансной камеры и охлаждение выходящей струи. Более детальная термодинамическая модель преобразования энергии в волновом криогенераторе резонансного типа изложена в работе [20].



Таким образом, несмотря на кажущиеся отличия, в основе работы рассмотренных аппаратов лежит один и тот же принцип термической неравномерности в пульсирующем газе. В вихревых трубках этот процесс уплотнён по радиусу вихревой камеры, а его источником выступают турбулентные явления. В резонансных и пульсационных охладителях упругие колебания столба газовой среды генерируются механическими или струйными (акустическими) средствами. Наиболее близкими по физической сущности являются технические решения, которые иллюстрируются рисунками 1,б и 1,в. Аппараты, реализующие вихревой и резонансный принцип охлаждения потока, могут иметь идентичные эксплуатационные показатели. Отличить их друг от друга можно только по косвенным признакам и внешним проявлениям, сопровождающим работу, например, по характеру распределения температуры вдоль стенок камеры или по частотным акустическим параметрам [11].

На характеристики вихревых и волновых преобразователей энергии влияют не только термодинамические параметры газа, но в большей мере их геомет-

рические размеры и особенности конструкций. Анализ многочисленных экспериментов позволил выработать рекомендации для выбора их некоторых геометрических показателей. При разработке вихревых труб, приведённых на рисунках 1,а и 1,б, предлагается использовать следующие соотношения между основными размерами:

$$F = \sigma \frac{\pi}{4} D^2; \quad \sigma = 0,05 \dots 0,10;$$

$$d = (0,5 \dots 0,6) D; \quad L_K = 3D; \quad L \geq 9D,$$

где  $F$  — площадь проходного сечения сопла.

Для волнового криогенератора (см. рис. 1,в) в работе [20] приводятся следующие рекомендации:

$$F = \frac{\pi}{4} (d^2 - b^2); \quad b = 0,75d; \quad L = a/4f,$$

где  $a = (R_0 M^{-1} k T)^{1/2}$  — скорость звука в газе;  $R_0 = 8314$  Дж/кмольК — универсальная газовая постоянная;  $M, k, T$  — молекулярная масса, показатель адиабаты и температура газа, соответственно;  $f = 100 \dots 150$  Гц — резонансная частота автоколебаний газа.

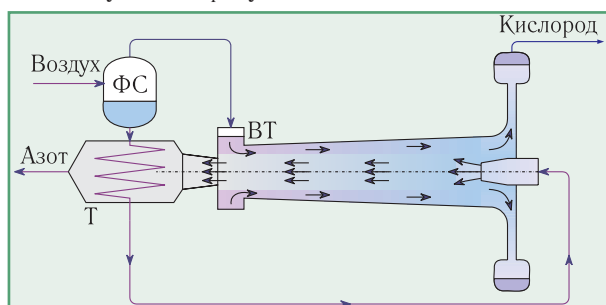
### 3. СХЕМЫ ОХЛАДИТЕЛЕЙ И СЕПАРАТОРОВ С БЕЗМАШИНЫМИ АППАРАТАМИ

Известны несколько способов разделения газовых смесей с применением газодинамических устройств. Способ сепарации [21] характеризуется тем, что эффект компонентного расслоения потока достигается за счёт ударной волны. Оригинальный метод очистки перерабатываемого воздуха от углекислоты основан на использовании газоструйного смесителя [22]. В этом аппарате происходит распыление жидкого воздуха из воздуходелительной установки (ВРУ) и кристаллизация  $\text{CO}_2$  в потоке. В осушителе газа [23] греющий и охлаждающий эффекты вихревой трубы использованы для обеспечения теплового режима адсорберов. В неоновых установках [24,25] и при переработке природного газа [26] эти же функции оказываются востребованными при подводе тепла к кубу ректификационной колонны с одновременным охлаждением её конденсатора.

Метод отделения твёрдых и жидких фракций во вращающемся потоке известен более столетия. Следует напомнить, что открытие в 1931 г. температурного вихревого эффекта явилось следствием изучения циклонов-сепараторов [1]. Эффект разделения двухфазных потоков в поле центробежных сил совершенствовался по мере развития охлаждающих вихревых систем [27]. Проблеме выделения конденсата непосредственно в вихревой трубе посвящены многие работы [28], так как образование твёрдой фазы часто искажает геометрию проточной части и отрицательно сказывается на энергетической эффективности. Но при правильном схемном и конструктивном оформлении вихревой камеры удаётся совместить в одном устройстве обе функции: и охлаждающую, и сепарацион-

ную [29,30]. В 70-ых годах в России были проведены исследования криогенных вихревых ректификаторов [15,31], способных из частично сжиженного воздуха получать обогащённый кислородом до 98 % поток либо фракцию с содержанием в ней 97 % азота.

На рис. 5 представлена схема работы вихревого сепаратора воздуха. На вход изображённого устройства подаётся воздух, предварительно охлаждённый до влажного состояния. Паровую фракцию сепаратора ФС направляют в сопло вихревой трубы ВТ, а жидкую фазу переохлаждают на 2...5 К в теплообменнике Т с помощью холодного потока. Этот поток, отбираемый в осевой области вихревой трубы, состоит практически из чистого азота. На периферии камеры энергоделения формируется слой жидкости, близкой по составу к кислороду.



**Рис. 5.** Вихревой ректификатор воздуха [31]:  
ФС — предварительный фазовый сепаратор;  
Т — теплообменник; ВТ — вихревая труба-сепаратор

Включение безмашинных устройств в схему ВРУ, реализующей цикл высокого давления, позволяет уменьшить степень расширения воздуха в турбодетандере. За счёт дополнительной ступени начальное

давление на входе в расширительную машину падает с 20 до 8 МПа. В результате снижаются газодинамические потери в проточной части турбодетандера, уменьшаются динамические нагрузки и величина оптимальной скорости вращения ротора [32]. Наряду с этим растут геометрические размеры проточной части и положительно сказывается на эффективности детандера влияние масштабного фактора. На рис. 6 показаны варианты включения газодинамических криогенаторов в схему ВРУ высокого давления.

Важной сферой использования безмашинных аппаратов является гелиевая техника. В криогенных установках, работающих на смеси легкого газа (гелия) и вспомогательного компонента, высококипящий продукт (фреон) отделяется в виде жидкой фазы в вихревом сепараторе [29] (рис. 7,а) или в каскаде вихревых аппаратов, сочетающих функции охлаждающих и разделительных устройств [30].

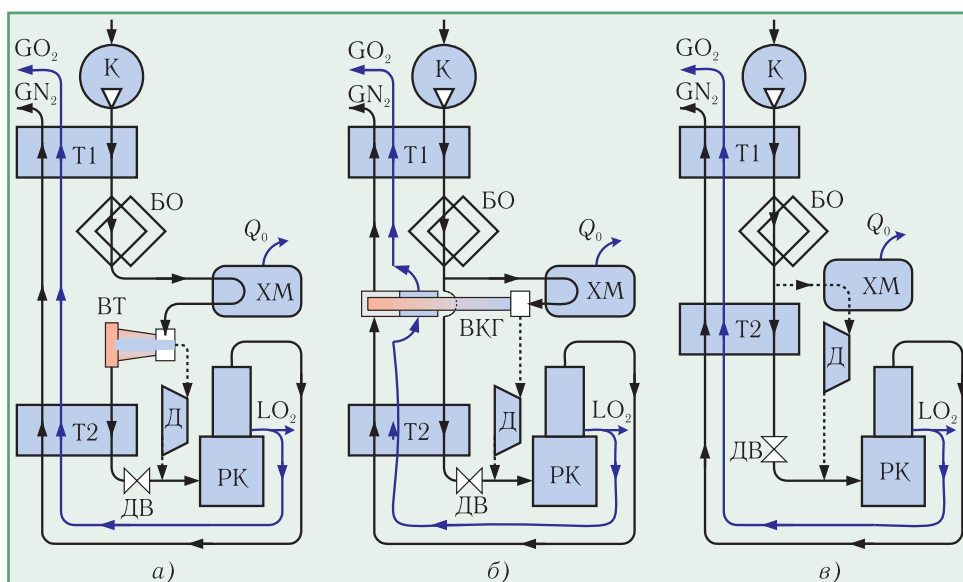
Примеры включения волновых аппаратов в схемы гелиевых блоков показаны на рисунках 7,б и 7,в. В низкотемпературной установке [33] кинетическая энергия расширяющегося криоагента преобразуется в энергию акустических колебаний. Она отводится в виде тепла в теплообменнике Т3 за счёт обратного потока и дополнительно в Т2, в который вводится поток из детандера Д.

На рис. 7,в показана модернизированная схема КГУ-250/4,5 [34-36]. В ней, параллельно с дросселем ДВ1, включён волновой криогенатор ВКГ. При закрытом ДВ1 тепло, выделяемое в резонансной трубке, отводится к детандерному потоку Д1-Д2. За счёт дополнительного охлаждения части прямого потока в теплообменнике Т6 увеличивается изотермический дроссель-эффект на входе в ступень Т7-ДВ2. Это способствует повышению

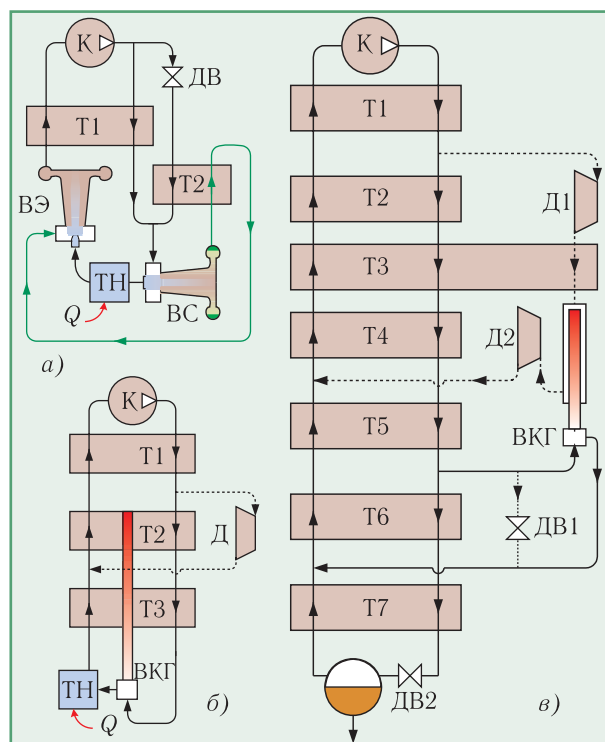
производительности оживителя по сравнению со штатным режимом.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕПАРАТОРА НЕОНО-ГЕЛИЕВОЙ СМЕСИ

На рис. 8,а представлена схема крупномасштабной вихревой трубы, предназначенной для разделения углеводородных смесей на компоненты [37]. На рис. 8,б изображено устройство миниатюрного сепаратора, диаметр которого на два порядка меньше, чем у известного устройства (см. рис. 8,а). Маломасштабная вихревая труба предназ-



**Рис. 6.** Вихревой (а) и волновой (б) охладители в составе ВРУ высокого давления КожКАж-0,25; в — упрощенный вариант технологической схемы, согласно [32]:  
К — компрессор; Т1, Т2 — рекуперативные теплообменники; ХМ — холодильная машина; ДВ — дроссельный вентиль; РК — ректификационная колонна;  
Д — детандер; БО — блок комплексной очистки воздуха; ВКГ — волновой криогенатор; ВТ — вихревая труба; LO<sub>2</sub> — жидкий кислород;  
GN<sub>2</sub>, GO<sub>2</sub> — газообразные азот и кислород

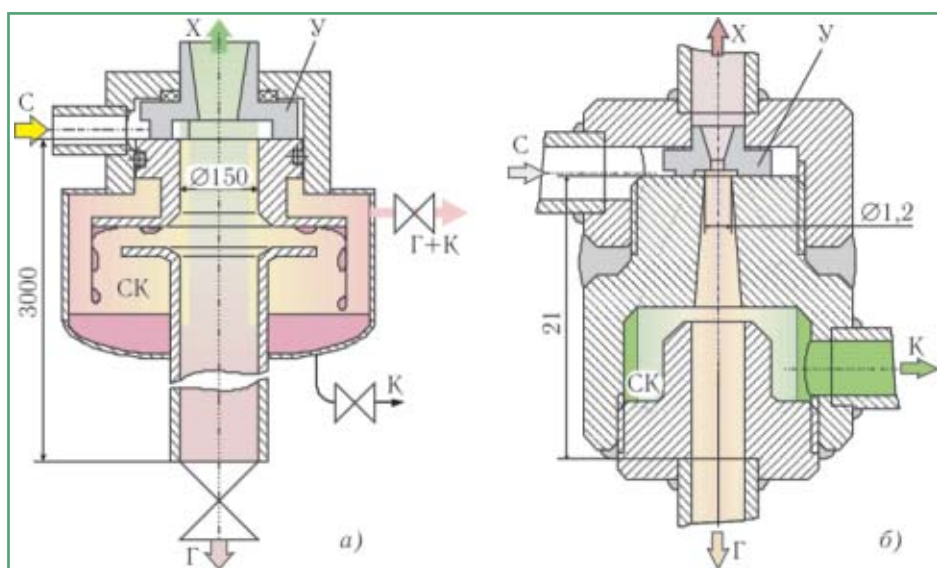


**Рис. 7.** Безмашинные аппараты в составе криогенных гелиевых установок: а — вихревые сепаратор ВС и эжектор ВЭ в установке, использующей гелий-фреоновые смеси [29]; б — низкотемпературный волновой генератор акустической энергии ВКГ в схеме рефрижератора [33] с детандером Д; в — вариант включения ВКГ в схему ожежителя КГУ-250/4,5 [34-36]; К — компрессоры; ДВ1, ДВ2 — дроссели; Т1-Т7 — рекуперативные теплообменники; ТН — тепловая нагрузка; Д, Д1, Д2 — детандеры

начена для отделения неоновой флегмы из смеси He-Ne. В работах [24,25] отмечалось, что при получении гелия из указанной смеси можно уменьшить нагрузку

на адсорберы-поглотители неона. Для этой цели предлагалось использовать метод фазовой сепарации Ne при  $P=2,5...3$  МПа и  $T<28$  К. Одним из возможных способов понижения температуры фазового равновесия является переохлаждение потока в вихревой трубе. Сложность практического воплощения подобной установки заключалась в малых размерах проточной части и отсутствии информации об оптимальной геометрии подобных аппаратов. Созданию низкотемпературного блока предшествовали предварительные испытания вихревых камер при повышенных температурах [38], а также совершенствование технологии изготовления спиральных улиток [39]. Необходимость экспериментальной проверки работоспособности маломасштабных вихревых камер продиктована предположением некоторых авторов об «угасании» вихревого разделения в трубах с  $D<2$  мм из-за отрицательного влияния пограничного слоя. Современный же уровень теоретических работ в области вихревого эффекта не позволяет прогнозировать охлаждающий и сепарационный эффекты в столь малых аппаратах.

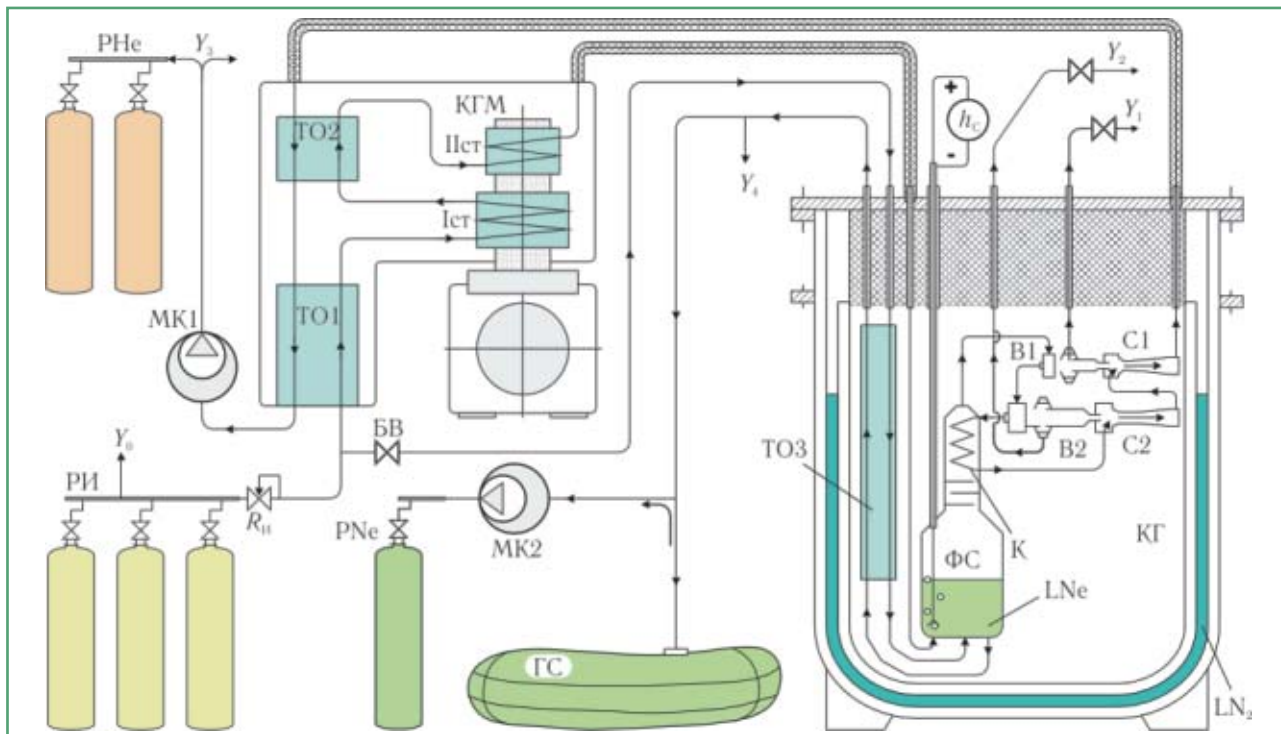
Упрощённая схема экспериментальной установки показана на рис. 9. В качестве исходного продукта в ней использована неонгелиевая смесь с типичным составом  $y_{Ne}=18...20$  %. Для эффективной работы фазового сепаратора ФС давление в нём поддерживалось на уровне 1,2...1,6 МПа, а на всасывающей линии компрессора МК1 — 0,15...0,2 МПа. Таким образом располагаемое отношение давлений (без учёта эжекторов-смесителей С1 и С2) составляло 6...10,7. В качестве первой ступени использована микромасштабная вихревая камера с рекордно малым диаметром  $D_1=1,5$  мм! Во второй ступени —  $D_2=2$  мм. Небольшие размеры проточной части были обусловлены весьма малыми критическими сечениями сопловых вводов:  $F_1=0,1$  и  $F_2=0,3$  мм<sup>2</sup> [25]. Изготовление таких деталей было связано со значительными технологическими сложностями. Задачу удалось решить на



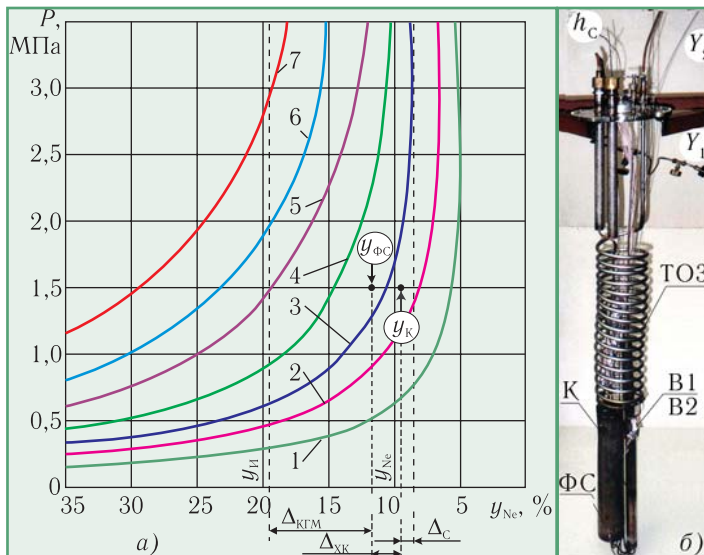
**Рис. 8.** Вихревые трубы для разделения двухфазных газовых смесей: а — углеводородов [37]; б — He-Ne-смеси при  $T\approx 30$  К [25]; У — улитка вихревой трубы; СК — сборник конденсата; С — ввод сжатой смеси; Х и Г — выходы холодного и горячего потоков; К — выход конденсата

пределе возможности современных прецизионных искрорезных станков с числовым программным управлением. Доводка деталей выполнялась под микроскопом с помощью специально созданных суппортов-манипуляторов.

Для ограничения расходов горячих потоков в аппаратах В1 и В2 применялись калиброванные отверстия. Кинетическая энергия истекающих через них потоков использовалась в эжекторах-смесителях С1 и С2. Такое решение позволило несколько упростить схему низкотемпературного блока, но пот-



**Рис. 9.** Схема установки для компонентного разделения неонгелиевой смеси при  $T=25...28$  К с использованием вихревых труб [25]: PИ, PNe и PHe — рампы исходной смеси, неонového концентрата и гелия;  $R_{и}$  — редуктор; TO1-TO3 — теплообменники-рекуператоры; КГМ — двухступенчатая газовая криогенная машина марки КГМ-100/20 (см. табл. 1); Ист и Ист — рефрижераторные головки первой и второй ступеней КГМ ( $T_I=30$  К;  $T_{II}=80$  К); ГС — сухой газгольдер; КГ — криостат гелиевый марки КГ-60/300; ФС — фазовый сепаратор; К — дополнительный конденсатор; B1 и B2 — вихревые трубы с ловушками конденсата; C1, C2 — эжекторы-смесители; БВ — вентиль баланса расходов; МК1 и МК2 — мембранные компрессоры;  $Y_0$ - $Y_4$  — точки газового анализа



**Рис. 10.** Изменения концентраций потоков в диаграмме  $P$ - $y$  (а) на изотермах: 1 — 24,7; 2 — 26; 3 — 27; 4 — 28; 5 — 29; 6 — 30; 7 — 31 К; низкотемпературный блок экспериментального стенда (б) (обозначения — согласно рис. 9)

**Таблица 1.** Характеристики двухступенчатой КГМ-100/20 (производитель — ПО «Гелиймаш», г. Москва)

Холодопроизводительность, Вт		Мощность, кВт	Давление в цикле, МПа	
I-я ступень, (80 К)	II-я ступень, (20 К)		Мин.	Макс.
240	70	22	2,0	4,4

ребовало нескольких последовательных подгонок сечений сопловых деталей.

Представленная на рис. 9 установка работает следующим образом. Исходная смесь с содержанием неона  $y_{Ne} \approx 20\%$  подаётся из рампы PИ в установку. Давление стабилизируется редуктором  $R_{и}$  на уровне  $P=2...2,5$  МПа. Основная часть прямого потока (примерно 80..90 % от общего расхода) направляется в блок теплообменников и рефрижераторов КГМ по цепи TO1→Ист→TO2→Ист, где охлаждается до  $T \approx 30$  К и подаётся в виде двухфазной смеси в сепаратор ФС. Непосредственно над точкой ввода размещён вход в канал «+» указателя уровня жидкости  $h_c$  сепаратора. За счёт этого предотвращается попадание неона в трубку, так как она оказывается заполненной на всём протяжении гелием. Это позволяет формировать корректный сигнал  $\Delta P=(P^+-P^-)$ , пропорциональный  $h_c$ .

Меньшая доля исходной смеси через регулятор расхода БВ поступает в теплообменник TO3 и затем входит в фазовый конденсатор ФС. За счёт конденсации неона в нижней части ФС концентрация его в паровой фазе падает с  $y_0=18...20\%$  до  $y_{Фс}=12...13\%$  (см. рис. 10). Частично обогащённый гелий с параметрами  $y_{Фс}$ ;  $T=27,5$  К и  $P=1,5$  МПа проходит через дополнительный конденсатор, в котором его температура снижается на один градус, а содержа-

ние неона — до  $y_K=9...10\%$ . Отвод тепла конденсации осуществляется к холодному потоку с  $T_{х2}=25\text{ К}$  вихревой трубы В2 при недорекуперации в аппарате К  $\Delta T=1...1,5\text{ К}$ .

Дальнейшее обогащение гелиевого концентрата продолжается в вихревых ступенях В1 и В2 за счёт отбора из ловушек концентрированного неона. В точках  $Y_1$  и  $Y_2$  доля неона достигает 95 %.

Показанные на диаграмме изменения концентраций можно условно разделить на три фрагмента:  $\Delta_{КГМ}$  — «заслуга» внешнего контура охлаждения — газовой криогенной машины (фазовый сепаратор ФС);  $\Delta_{ХК}$  — вклад холодильной части вихревого эффекта (конденсатор К);  $\Delta_C$  — сепарационная составляющая обеих вихревых труб В1, В2 (ловушки конденсата).

После расширения в вихревых трубах поток гелия с содержанием неона не более 8 % отбирается с постоянным расходом  $V=8...10\text{ нм}^3/\text{ч}$  через теплообменники ТО1, ТО2 во всасывающую линию мембранного компрессора МК1. Кубовая фракция фазового сепаратора ФС с содержанием гелия менее 2 % и отдувки ловушек вихревых сепараторов  $Y_1$  и  $Y_2$  собираются в газгольдере ГС и периодически откачиваются компрессором МК2 в баллоны для переработки в ректификационной установке [24, 25].

Влияние обогащения Не на степень извлечения неона (табл. 2) в ректификационной установке определялась по формуле, приведённой в [25]:

$$c_{\text{Ne}} = 1 - \frac{y_{\text{Ne}}^{\text{II}} (1 - y_{\text{Ne}}^{\text{I}})}{y_{\text{Ne}}^{\text{I}} (1 - y_{\text{Ne}}^{\text{II}})}, \quad (3)$$

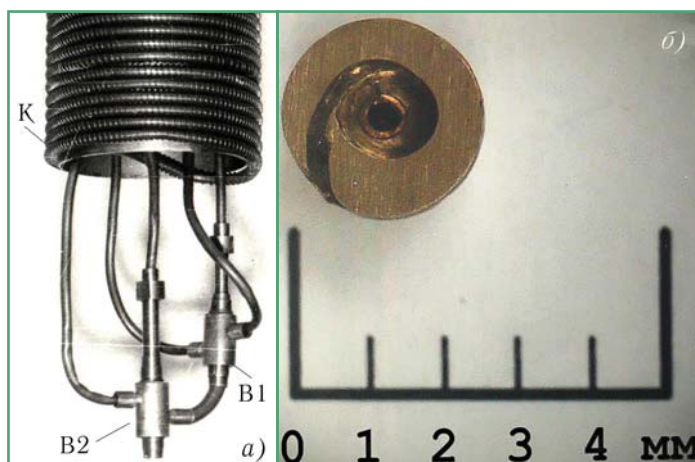


Рис. 11. Блок вихревых труб и конденсатора К (а); б — улитка вихревой трубы В1 при увеличении в 15 раз (видна шероховатость металла и несовершенство канала, обусловленное отклонением от спирали Архимеда)

Таблица 2. Степень извлечения Не в зависимости от способа обогащения Не при  $y_{\text{Ne}}^{\text{I}}=77\%$

Тип сепаратора гелия и условия его работы	$y_{\text{Ne}}^{\text{II}}, \%$	$c_{\text{Ne}}, \%$
Фазовый сепаратор гелия в составе установки [24, 25]	$y_{\text{II}}=18...20$	92,5
Фазовый сепаратор гелия ФС после КГМ (рис. 9)	$y_{\text{ФС}}=12...13$	95,9
Дополнительный конденсатор К (рис. 9) с вихревым охладителем	$y_K=9...10$	96,7
Гелиевый концентрат после смесителя С1	$y_3=8,5$	97,2
Ловушки конденсата в вихревых трубах В1 и В2	$y_1(y_2)=90...95$	97,2

где  $y_{\text{Ne}}^{\text{I}}$  и  $y_{\text{Ne}}^{\text{II}}$  — концентрации неона в исходной смеси и гелиевом продукте.

Анализ опытных данных (см. табл. 2) показал, что за счёт совместного использования криогенной газовой машины и каскада вихревых труб удаётся концентрацию неона в смеси снижать до 10 %, а коэффициент извлечения увеличивать на 5 %.

В ходе первой серии испытаний подтверждён приемлемый уровень эффективности миниатюрных вихревых аппаратов, адиабатный КПД которых составлял 6...10 % (первый показатель характерен для В1, а второй — для В2). Выявлена неустойчивая работа второй ступени из-за кристаллизации неона в диафрагме. Этот факт также подтверждался показаниями датчиков температуры холодного потока на выходе В2 ( $T_{х2}=24,6\text{ К}$ ). Для исключения этого неблагоприятного явления требовался постоянный отбор неона из ловушек  $Y_1$  и  $Y_2$  с концентрацией не выше 95 % Не.

Ранее показано, что ступенчатое включение газодинамических охладителей даёт возможность снизить локальную степень расширения в отдельных каскадах. При работе с маломасштабными устройствами выявлен ещё один важный довод в пользу ступенчатого расширения. Как известно [25,40], расходные характеристики последовательно включённых расширительных устройств определяются сечением соплового ввода первого каскада. На входе во вторую и последующие ступени давление падает, а их размеры, соответственно, увеличиваются. При этом качество (точность и чистота поверхности) изготовления улиток будет выше (см. рис. 11). Следствием такого шага явилось увеличение энергетической эффективности нижних ступеней.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования подтверждают перспективность использования газодинамических охладителей-сепараторов. Можно предположить, что при переходе к промышленным установкам с расходом перерабатываемого продукта свыше 40 нм<sup>3</sup>/ч эффективность охлаждающей и сепарационной функций вихревого эффекта будут увеличены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Patent USA No 1952281. Method and Apparatus for Obtaining from Fluid Under Pressure Two Currents of Fluids Different Temperatures.
2. Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kaelteprozess// Zeitschrift fuer Naturforschung. — 1946. — Bd. 1. — No 4. — S. 208-214.
3. Дубинский М.Г.



О вращающихся потоках газа// Известия АН СССР, сер. ОТИ. — 1954. — № 8. — С. 75-79.

4. **Мартыновский В.С., Алексеев В.П.** Исследование эффекта вихревого температурного разделения газов и паров// ЖТФ. — 1956. — Т. 26. — Вып. 10. — С. 2303-2315.

5. **Бродянский В.М., Лейтес И.Л.** О градиенте температур в трубе Ранка-Хилша// ИФЖ. — 1960. — Т. 3. — № 12. — С. 72-77.

6. **Sprenger H.** Ueber thermische Effekte in Resonanzrohren// Mitteilungen aus dem Intitute fuer Aerodynamic. — 1954. — Bd. 21. — S. 18-35.

7. Cooling effect at wave expansion of gas stream/ **А.М. Архаров, В.Г. Пронко, V.L. Bondarenko et al.**// Proc. of the 16 Int. Congr. of Refrig. — Paris. — 1983. — P. 80-84.

8. Криогенные газовые машины/ **А.Д. Суслов, Г.А. Горюховский, В.Б. Полтараус, А.М. Горшков.** — М.: Машиностроение, 1982. — 213 с.

9. **Симоненко Ю.М., Дроздов А.Ф., Крымова Т.А.** Исследования дроссельной ступени ожижителя гелия с вихревой трубой// Кн. «Вихревой эффект и его применение в технике». — Самара: САИ, 1992. — С. 42-47.

10. **Пиралишвили Ш.А., Новиков Н.Н.** Экспериментальные характеристики вихревых нагревателей// Изв. вузов. Авиационная техника. — 1984. — № 1. — С. 93-95.

11. **Азаров А.И., Жуков Б.П., Симоненко Ю.М.** Исследование акустических характеристик вихревого охладителя воздуха// Холодильная техника и технология. — 1982. — Вып. 35. — С. 76-80.

12. Очистка природного газа с помощью вихревого эффекта/ **И.Л. Лейтес, В.П. Семёнов, В.А. Половинкин и др.**// Кн. «Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленного применения». — Куйбышев: КуАИ, 1974. — С. 85-93.

13. **Рачевский Б.С.** Сжиженные углеводородные газы. — М.: «Нефть и газ», 2009. — 640 с.

14. **Суслов А.Д., Чижиков Ю.В., Иванов С.В.** Разработка и исследование нового типа воздуходелительного аппарата — вихревого ректификатора// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1980. — № 9. — С. 5-6.

15. Вихревые аппараты/ **А.Д. Суслов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков.** — М.: Машиностроение, 1985. — 252 с.

16. **Десятов А.Т.** Криогенаторы с пульсационной и резонансной трубами, Обзорная информация. Серия ХМ-6. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1985. — 43 с.

17. **Азаров А.И., Симоненко Ю.М., Кочанов Д.П.** Результаты исследования орбренных вихревых труб с воздушным охлаждением// Сб. «Холодильные машины и термотрансформаторы. Термогазодинамические процессы холодильных машин». — Л.: ЛТИХП, 1984. — С. 64-69.

18. **Меркулов А.П.** Вихревой эффект и его применение в технике. — М: Машиностроение, 1969. — 182 с.

19. Авторское свидетельство СССР № 1090983. Вихревая труба. МКИ F 25 В 9/02.

20. **Бондаренко В.Л., Лосьяков Н.П.** Волновые криогенаторы в технологиях извлечения редких газов// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 24-31.

21. Авторское свидетельство СССР № 330590. Способ разделения газовой смеси. МКИ В 01 d 15/08.

22. **Козлов В.Н., Щекин Д.А.** Струйный конденсатор CO<sub>2</sub> в воздуходелительной установке// Вестник МГТУ

им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Выпуск «Криогенная и холодильная техника, технология». — 1995. — № 2. — С. 38-41.

23. Авторское свидетельство СССР № 328928. Способ регенерации адсорбционных блоков осушки газа. МКИ В 01 d 53/04

24. Пути повышения коэффициента извлечения неона при разделении неонгелиевой смеси/ **А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др.**// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Выпуск «Криогенная и холодильная техника». — 1998. — С. 44-52.

25. **Arkharov A.M., Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M.** Increasing of Separator Efficiency of Neon-Helium Mixture by Using the Unmachine Devices// Proc. of 5 Int. Conf. Cryogenics'98. — Praha. — 1998. — P. 70-73.

26. Авторское свидетельство СССР № 366323. Способ разделения сжатых газовых смесей. МКИ F 25 j 3/02.

27. Авторское свидетельство СССР № 1583143. Сепаратор. МКИ В 01 D 45/00.

28. Авторское свидетельство СССР № 1255825. Вихревая труба и способ стабилизации режима работы вихревой трубы. МКИ F 25 В 9/02.

29. Авторское свидетельство СССР № 1449791. Способ работы криогенной установки. МКИ F 25 В 9/02.

30. Авторское свидетельство СССР № 1451484. Криогенная установка. МКИ F 25 В 9/02.

31. Авторское свидетельство СССР № 638815. Способ разделения воздуха в вихревой трубе. МКИ F 25 В 9/02.

32. **Шадрина В.Ю.** Анализ схем холодильного цикла с турбодетандером и вихревой трубой малых установок для получения жидких и газообразных продуктов разделения воздуха// Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана «Криогенная техника и кондиционирование». — 1984. — № 430. — С. 23-30.

33. Авторское свидетельство СССР № 1086318. Криогенная установка. МКИ В 9/02.

34. Волновые криогенаторы в системах очистки Ne-Ne смеси/ **А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, М.Ю. Савинов и др.**// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Выпуск «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения». — 2002. — С. 4-9.

35. Wave Cryogenerators Applied in Technologies of Rare Gas Separation/ **V.L. Bondarenko, A.M. Arkharov, Yu.M. Simonenko et al.**// Proc. of 22<sup>nd</sup> International Congress of Refrigeration. — China. — 2007. — ICR-A2-132.

36. Wave cryogenerators applied in technologies of rare gas separation/ **V.L. Bondarenko, A.M. Archarov, Yu.M. Simonenko et al.**// Frio-Calor Aire Acondicionado. — № 405. — Julio/Agosto 2008. — № 405. — P. 3-11.

37. Исследование работы трехпоточной вихревой трубы на нефтяном газе/ **А.А. Чернов, Е.М. Брещенко, Г.Н. Бобровников и др.**// Сб. «Переработка нефтяных газов». — М.: ВНИИОЭНГ, 1981. — Вып. 7. — С. 115-123.

38. **Кузьмин А.А., Муратов С.О., Симоненко Ю.М.** Маломасштабные вихревые трубы// Труды IV-ой Всесоюзной научно-технической конференции по исследованию вихревого эффекта и его применению в технике. — Куйбышев: КуАИ, 1984. — С. 63-65.

39. Авторское свидетельство СССР № 1252622. Способ изготовления улитки вихревой трубы. МКИ F 25 В 9/02.

40. **Рипс С.М.** Основы термодинамики и теплотехники. — М.: Высшая школа, 1967. — 347 с.