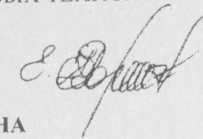


Автореферат  
К 66

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



КОРЖ ЕЛИЗАВЕТА ГРИГОРЬЕВНА

УДК 536. (043.3); 621.565:621.59, 661.9

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В  
УСТАНОВКАХ ПОЛУЧЕНИЯ КРИПТОНОКСЕНОНОВОГО  
КОНЦЕНТРАТА

Специальность 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника,  
системы кондиционирования»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 22.12.2014 г.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная  
Гарнитура Times. Печать ризографическая.  
Зак. № 31. Тираж 50 экз..

Отпечатано ООО "Внешрекламсервис"  
65011, г.Одесса, ул. Успенская, 40.  
тел. 37-70-76, 777-70-76

Одесса – 2014

А.В.Медведь  
К66

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время тяжелые инертные газы криптон и ксенон являются ценными промышленными продуктами, находящими все более широкое применение в различных отраслях промышленности и науки. Смесями на основе тяжелых инертных газов заполнены лампы прожекторов, оптических печей, импульсные источники света и ячейки плазменных дисплеев. В медицине ксенон востребован в качестве эффективного и безопасного анестезирующего средства, а смеси Кг и Хе – рабочего тела эксимерных лазеров, также применяемых в медицине. Для коррекции орбит спутников связи часто используют ксеноновые ионные двигатели.

Единственным промышленным источником тяжелых инертных газов (Кг и Хе) является атмосферный воздух. Для снижения расходов на очистку редких газов и повышения степени извлечения необходимо совершенствовать всю технологическую последовательность получения криптона и ксенона от начальных стадий обогащения сырья в воздухоразделительной колонне до производства чистых товарных продуктов. Особенно актуально это для первых ступеней технологии, поскольку из-за низкой концентрации Кг и Хе указанные этапы являются наиболее энергозатратными.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Исследования систем обогащения криптоноксеноновой смеси выполнены согласно Закону Украины «О приоритетных направлениях развития науки и техники» от 11.07.2001, № 2623 – III, в котором особое внимание уделено направлению: «Новейшие и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и АПК».

Представленные в диссертации материалы использованы в процессах усовершенствования эксплуатируемых и создаваемых новых установок обогащения первичной Кг-Хе-смеси, внедряемых на кислородных производствах различных предприятий.

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – совершенствование технологии обогащения первичной криптоноксеноновой смеси путем снижения удельного энергопотребления за счет оптимизации тепломассообменных процессов и аппаратов, входящих в систему. В рамках общего направления основными задачами исследования являются:

- изучение технологии извлечения инертных газов криптона и ксенона из воздуха и отбросных потоков химических предприятий, выявление «узких» мест в технологической последовательности получения чистых продуктов;
- критическое рассмотрение технологий обогащения Кг и Хе;
- оптимизация конструкций рекуперативных теплообменных аппаратов, входящих в состав установок обогащения криптоноксеноновой смеси нового поколения;
- исследование безмашинных методов увеличения давления потока и особенностей их использования на этапе обогащения Кг-Хе-смеси;
- создание экспериментальной установки для исследования парлифтного нагнетателя и получения его расходных характеристик;
- создание методики расчета расходных характеристик безмашинного нагнетателя на основе парлифта;

xv 760  
ИНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
библиотека

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Одесской национальной академии пищевых технологий (ОНАПТ) Министерства образования и науки Украины

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Бондаренко Виталий Леонидович,**  
профессор кафедры криогенной техники  
Одесской национальной академии пищевых  
технологий МОН Украины

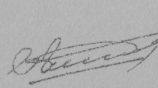
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Лавренченко Георгий Константинович,**  
президент Украинской ассоциации производителей  
технических газов «УА-СИГМА»

кандидат технических наук  
**Петухов Илья Иванович,**  
доцент кафедры аэрокосмической теплотехники  
Национального аэрокосмического университета  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» МОН Украины

Защита диссертации состоится « 16 » марта 2015 г. в 14.30 в ауд. 108 на заседании специализированного ученого совета Д41.088.03 при Одесской национальной академии пищевых технологий по адресу: ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082.

Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОНАПТ по адресу: ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082.

« 28 » января 2015 г.

 В.И. Милованов

... Kruckels, W. 1969. Photometrische Messung optischen Stoffübergangs an Guetangs-Kreiszykladern. Chem. Ingenieur Technik

... a wide range of practical applications. This method is not influenced on surfaces. Characteristics is ev... condition... and al... coefficient of heat tra... characteristics is ev... condition... and al... surfaces. This method is not influenced on surfaces. Characteristics is ev... condition... and al... a wide range of practical applications. This method is not influenced on surfaces. Characteristics is ev... condition... and al...

– структуризация затрат на получение первичной Кг-Хе-смеси, извлекаемой в процессе получения основных продуктов разделения воздуха, определение ее себестоимости;

– расчет себестоимости криптоноксенонового концентрата на выходе из установки вторичного обогащения;

– определение экономического эффекта от внедрения безмашинной ступени повышения давления на основе парлифта в установках обогащения криптоноксеноновой смеси.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является технология получения криптоноксенонового концентрата из первичной Кг-Хе-смеси, извлекаемой на ВРУ. Предмет исследования – характеристики и конструкции тепломасообменных аппаратов, входящих в состав системы обогащения, в частности, теплообменников-рекуператоров, конденсаторов-испарителей, насадочных ректификационных колонн, а также безмашинных струйных нагнетателей на основе парлифта.

**Методы исследования.** Теоретические – при разработке схемных и конструктивных решений и аналитического исследования работы парлифтного нагнетателя; расчетные – при разработке программ расчетов рекуперативных теплообменных аппаратов и конденсаторов-испарителей; экспериментальные – в процессе создания стенда и исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Доказано в результате сравнительного анализа характеристик кожухотрубных витых и U-подобных теплообменных аппаратов, что наиболее эффективные рекуператоры в установках обогащения криптоноксеноновых смесей следует создавать на основе прямотрубных U-подобных теплообменных аппаратов с оребренными проволокой трубками.

2. Установлено при исследовании влияния на удельную поверхность теплообмена и массу прямотрубных конденсаторов-испарителей их конструктивных параметров, что указанные удельные характеристики, во-первых, не зависят от числа труб в трубном пучке, во-вторых, достигают наилучших значений при шахматном расположении кольцевых каналов.

3. Получены впервые на экспериментальной установке, не имеющей аналогов, расходные  $G-Q-h-d$  и  $G-x-d$ -характеристики парлифтного нагнетателя на температурном уровне 77,4...80 К при использовании жидкого азота как модельного вещества.

4. Найдена посредством обработки экспериментальных данных зависимость тепловой нагрузки, необходимой для обеспечения задаваемых напора и расхода жидкости при определенных значениях геометрических размеров напорной трубы.

5. Усовершенствована известная методика, предложенная профессором В.М. Бродянским, расчета себестоимости криптоноксеноновой смеси при одновременном производстве нескольких продуктов разделения воздуха и выполнена оценка себестоимости извлечения криптоноксеноновой смеси в крупнотоннажных ВРУ с учетом уровней оплаты труда на различных металлургических предприятиях.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие **научные положения:**

1. Зависимость расхода жидкого азота и его напора от необходимого количества теплоты, полученная при обработке результатов исследования безмашинного нагнетателя на основе парлифта, может использоваться для разработки подобного нагнетателя, работающего на жидком кислороде. Такой вывод дает возможность отказаться от проведения экспериментов с жидким кислородом из-за его высокой взрывоопасности.

2. Комплекс аппаратов, состоящий из столбового конденсатора, парлифтного нагнетателя и испарителя, который обеспечивает повышение давления криптоноксеноновой смеси до 0,6 МПа, заменяет компрессор в холодном блоке установки обогащения смеси. Исключение компрессора из технологической схемы установки снижает эксплуатационные расходы на единицу продукта более чем в 1,5 раза.

#### **Кроме этого, автор защищает:**

– оригинальные конструктивные и схемные решения, использованные в экспериментальной установке по исследованию парлифта, а также методику эксперимента и обработки опытных данных;

– данные экспериментального определения характеристик парлифтного нагнетателя при использовании сменных трубок длиной 6 м и внутренним диаметром 8-16 мм.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается удовлетворительным совпадением полученных результатов расчетных исследований теплообменных аппаратов с данными других авторов и экспериментальных исследований парлифтного нагнетателя с параметрами работы безмашинного устройства повышения давления в условиях эксплуатации опытно-промышленных установок для обогащения первичного криптоноксенонового концентрата нового поколения.

#### **Научное значение работы.**

На специально созданном стенде для исследования безмашинного устройства для повышения потенциальной энергии потока на основе парлифта с жидким азотом в качестве рабочего вещества получены расходные характеристики парлифтного нагнетателя в области криогенных температур. Эти результаты позволили создать методику расчета тепловой нагрузки, обеспечивающей заданные напорно-расходные характеристики нагнетателя при вполне определенных геометрических параметрах напорной трубы. Предложен способ перенесения полученных результатов на другие рабочие вещества.

#### **Практическое значение полученных результатов.**

1. Полученные значения коэффициентов перекрестного взаимодействия уравнения Редлиха-Квонга-Соава позволяют описывать свойства многокомпонентных смесей на основе криптона и ксенона.

2. Разработанные методики и компьютерные программы для расчетов теплообменных аппаратов, в частности, теплообменников-рекуператоров различных конструкций, прямотрубных конденсаторов-испарителей дают возможность упростить проектирование криогенных установок для обогащения тяжелых редких газов.

3. Созданная экспериментальная установка для исследования на жидком азоте парлифтного нагнетателя может использоваться для получения напорно-расходных

характеристик с учетом других условий работы установки вторичного обогащения криптоноксеноновой смеси.

4. Разработанная методика расчета затрат на извлечение криптоноксеноновой смеси может применяться для их расчета в условиях получения нескольких продуктов разделения воздуха в ВРУ. Данная методика позволяет определять затраты при получении криптоноксенонового концентрата в установках вторичного обогащения типа «Хром».

**Личный вклад соискателя** заключается в решении основных методических, теоретических и практических вопросов, в том числе:

- разработка алгоритмов (программ) расчета теплообменных аппаратов (рекуперативных теплообменников, конденсаторов-испарителей);
- проектирование стендового оборудования для исследования процессов в струйном безмашинном нагнетателе жидкого азота.

Автору также принадлежат: математическая модель, результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя при температуре 77,4 К и методика расчета тепловой нагрузки, обеспечивающей заданные напорно-расходные характеристики парлифта с различными геометрическими размерами напорных труб.

Личный вклад автора подтверждается публикациями, подготовленными в соавторстве с научным руководителем. В них раскрываются основные направления исследований, изложенные в диссертационной работе. Изготовление и испытания парлифтного нагнетателя проведены с использованием лабораторно-аналитической базы кафедры криогенной техники ОНАПТ и оборудования предприятия ООО «Айсблик», г. Одесса.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения, результаты и выводы диссертации докладывались на V-ой международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2011), I-ой международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы» (Йошкар-Ола, 2012), 14-ом международном семинаре «Повышение эффективности и безопасности производств продуктов разделения воздуха» (Одесса, 2013), международной Научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Стан, достижения и перспективы холодильной техники и технологий» (Одесса, 2011, 2012, 2013, 2014), Международной конференции «Промышленные газы» (Москва, 2014).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 5 статьях и 8 материалах конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, списка использованной литературы из 183 наименований и содержит 131 страницу основного текста, 22 таблицы и 65 рисунков.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, отображена связь с государственными программами, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены новые научные результаты, личный вклад соискателя, сведения об апробации результатов диссертации.

**Первый раздел.** Дефицит энергоресурсов вынуждает снижать их потребление. Ввиду постоянного увеличения стоимости энергоносителей снижение удельного

энергопотребления в различных технологических процессах становится все более актуальным. В криогенной технике необходимо повышать эффективность и экономичность систем сепарации путем применения перспективных схемных и конструктивных решений, учета свойств компонентов разделяемых смесей, оптимизации процессов разделения и извлечения ценных продуктов.

В первом разделе проведен анализ технологий получения инертных газов – криптона и ксенона, сырьем для промышленного производства которых является атмосфера Земли.

Технологические приемы извлечения Kr и Xe условно разделены на две группы в зависимости от характера физических процессов: адсорбционные и процессы фазовой сепарации (дефлегмация, ректификация, десублимация). В технологиях получения инертных газов они используются в определенной последовательности на всем протяжении технологической цепи: от ректификации жидкого атмосферного воздуха до получения чистых товарных веществ (рис. 1).

Основными этапами технологии получения чистых криптона и ксенона в соответствии с ректификационной технологией являются:

- 1) выделение первичного концентрата, содержащего 0,1...0,5 % Kr и Xe;
- 2) обогащение первичного концентрата, удаление из него взрывоопасных примесей углеводородов и получение чистой криптоноксеноновой смеси;
- 3) разделение этой смеси и производство чистых криптона и ксенона.

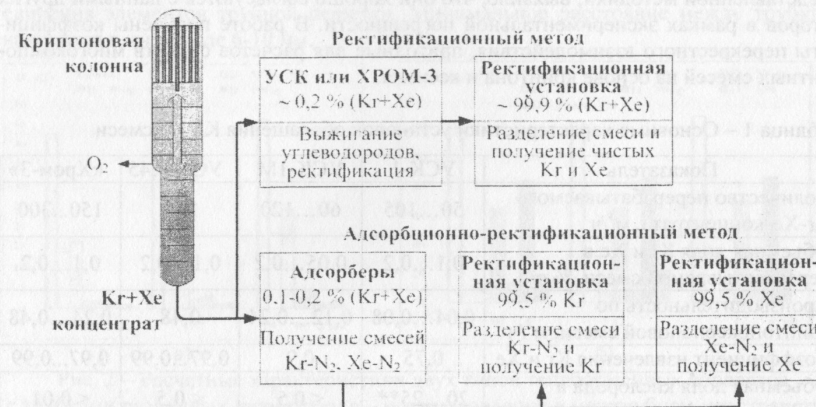


Рис. 1 – Основные этапы реализации двух технологий извлечения криптона и ксенона

Наиболее затратным по величине эксплуатационных расходов является второй этап технологии. Это связано с низким содержанием ценных продуктов в первичном концентрате (ограничение вызвано наличием взрывоопасных примесей) и низким избыточным давлением  $P < 0,02$  МПа. Для обеспечения технологического перепада давлений, необходимого для реализации последующих операций очистки, его недостаточно.

Получение криптоноксеноновой смеси до настоящего времени осуществлялось на устаревших установках типа УСК, которые характеризуются относительно низкой эффективностью. Большинство подобных установок выработали свой ресурс. Для их замены было разработано более прогрессивное оборудование (табл. 1).

Одним из способов снижения эксплуатационных расходов указанных систем может быть отказ от использования компрессоров и переход к безмашинным способам повышения давления потока.

В первом разделе также рассмотрены основные приемы теплохладоснабжения ректификационных и сорбционных установок на базе различных криогенных циклов и каскадных систем охлаждения, а также приведен обзор типов теплообменных аппаратов и массообменных поверхностей, используемых в насадочных ректификационных колоннах.

**Второй раздел** диссертации посвящен изучению физических основ получения тяжелых инертных газов из различных криптон- и ксенон-содержащих смесей, получаемых из воздуха.

Свойства Кг-Хе-смесей были описаны с использованием уравнения состояния Редлиха-Квонга-Соава с классическим правилом смешения Ван-дер-Ваальса. Сравнение результатов расчета для смесей Кг-Хе, Кг-О<sub>2</sub> и Кг-Н<sub>2</sub>, полученных на базе представленной методики, выявило, что они хорошо согласуются с данными других авторов в рамках экспериментальной погрешности. В работе получены коэффициенты перекрестного взаимодействия, пригодные для расчетов свойств многокомпонентных смесей на основе криптона и ксенона.

Таблица 1 – Основные характеристики установок обогащения Кг-Хе-смеси

Показатель	УСК-1	УСК-1М	УСК-0,45	«Хром-3»
Количество перерабатываемого Кг-Хе-концентрата, м <sup>3</sup> /ч	50...105	60...120	240	150...300
Объемная доля Кг и Хе в перерабатываемой смеси, %	0,1...0,2	0,05...0,2	0,1...0,2	0,1...0,2
Производительность по криптоноксеноновой смеси, м <sup>3</sup> /ч	0,04...0,08	0,12...0,24	0,48	0,24...0,48
Коэффициент извлечения Кг и Хе	0,75	0,9	0,97...0,99	0,97...0,99
Объемная доля кислорода в Кг-Хе-смеси, %	20...25**	< 0,5	< 0,5	< 0,01
Удельные затраты энергии на переработку ПКК	*	1,98	2,35	1,42
Удельные затраты энергии на получение ККС	*	991	1175	710

Примечания: \* – данные отсутствуют; \*\* – продукт нуждается в доочистке

Теплообменные аппараты являются неотъемлемой составляющей частью технологических процессов, связанных с сепарацией газовых смесей. В диссертации был проведен анализ работы кожухотрубных аппаратов для охлаждения прямого

потока: витых с разреженной навивкой и прямотрубных U-подобных. Результаты расчетов поверхности теплообмена, сопротивления в межтрубном пространстве и металлоемкости аппаратов показали, что U-подобные теплообменные аппараты заданных условий являются более эффективными, чем витые (рис. 2, а). Для изготовления U-подобных теплообменников требуется значительно меньше материала, чем для витых аппаратов (рис. 2, б). Из исследованных аппаратов оптимальным сочетанием можно считать прямотрубный U-подобный теплообменник из 27-ми оребренных проволокой трубок диаметром 12 мм с диаметром кожуха 80 мм.

Эффективность работы конденсаторов-испарителей оценивалась по их удельным характеристикам: поверхности теплообмена и металлоемкости.

$$\left. \begin{aligned} \text{Удельная поверхность теплообмена} \\ f = \frac{F}{V} = \frac{4 n D_{\text{н}}}{D_{\text{об}}^2}, \quad (1) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \text{Удельная металлоемкость} \\ m = \frac{M}{V} = f \delta \rho, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $F$  – теплообменная поверхность, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем трубного пространства, м<sup>3</sup>;  $n$  – число труб в аппарате, шт.;  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубы, м;  $D_{\text{об}}$  – диаметр обечайки, м;  $M$  – масса аппарата, кг;  $\delta$  – толщина стенки трубы, м;  $\rho$  – плотность материала, из которого изготовлены трубы, кг/м<sup>3</sup>.

В технологическом оборудовании используют три основных способа размещения труб в пучке: коридорное, шахматное и радиальное. Выбор конкретной структуры пучка задается располагаемым сортаментом труб и ограничена технологией соединения элементов трубной решетки. Минимальное расстояние между трубками находится в интервале 6-10 мм.

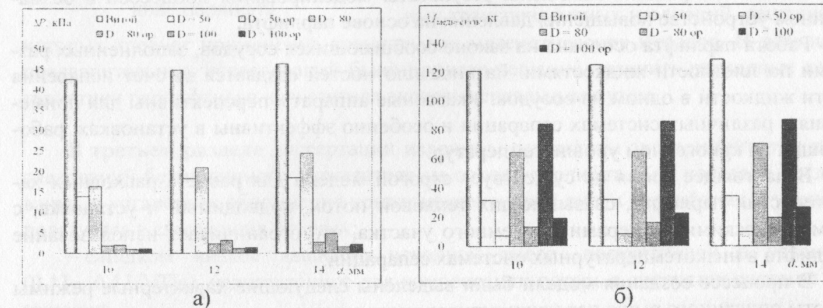


Рис. 2 – Расчетные характеристики двух типов теплообменных аппаратов с трубками различных диаметров: а – потери давления в межтрубном пространстве; б – масса металла, израсходованного на изготовление деталей теплообменного аппарата в зависимости от его конструкции и наличия оребрения

В процессе исследования трубчатых конденсаторов-испарителей, используемых в качестве столбового конденсатора установки «Хром-3», было обнаружено, что удельная поверхность теплообмена, в целом, уменьшается с ростом диаметра трубок (рис. 3, а). Однако для одиночных труб  $\varnothing 8 \times 1$  мм наблюдается оптимум. При этом удельная поверхность максимальна и равна 113,4 м<sup>2</sup>.

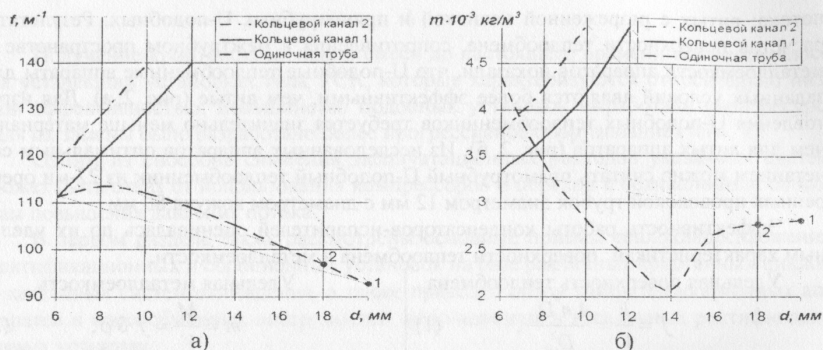


Рис. 3 – Результаты расчетов столбчатого конденсатора: а – удельная поверхность теплообмена; б – удельная масса. Расстояние между трубками равно 8 мм. Кольцевой канал 1: наружная трубка – 20×2 мм; кольцевой канал 2 – 18×2 мм. Точками «1» и «2» отмечены значения удельных параметров для диаметров 20×2 и 18×2 мм, соответственно

Для удельной массы пучка обнаруживается оптимум (минимум, рис. 3, б) для трубы 14×1 мм. Удельная масса при этом равна 2,1 т/м<sup>3</sup>.

В этом же разделе изложены результаты моделирования процессов в безмашинном устройстве повышения давления на основе парлифта.

Работа парлифта основана на законе сообщающихся сосудов, заполненных разными по плотности жидкостями. Разница плотностей создается за счет испарения части жидкости в одном из сосудов. Указанные аппараты перспективны для применения в различных системах сепарации и особенно эффективны в установках, работающих на криогенном уровне температур.

В настоящее время не существует строгой модели для расчета расходных характеристик парлифта, связывающих тепловой поток, подводимый к установке, с геометрическими размерами подъемного участка, что ограничивает использование парлифта в низкотемпературных системах сепарации.

В процессе создания модели были выделены следующие характерные режимы работы описанного выше парожидкостного нагнетателя:

1. При недостаточном количестве паровой фракции либо массы заправленной жидкости ее уровень в подъемной трубе не достигает верхней точки ( $h < h_{CC}$  или  $(H+h) < L$ , рис. 4). Система не является проточной, описанный режим практикуется в некоторых измерительных приборах. В соответствии с известными соотношениями для сообщающихся сосудов (без учета теплопритоков) получим:

$$h = H \varphi \frac{\rho_{ж} - \rho_{п}}{\rho_{см}} = H \varphi \frac{\rho_{ж} - \rho_{п}}{(1 - \varphi)\rho_{ж} + \varphi\rho_{п}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{ж}$  и  $\rho_{см}$  – плотность паровой, жидкой фаз и смеси пар-жидкость, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  и  $H$  – уровни поднятия жидкости в соответствии с рис. 4.

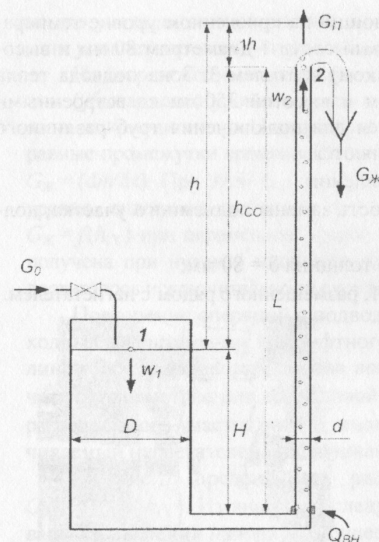


Рис. 4 – Схема работы устройства повышения давления потока на основе парлифта

которых требует применения специальных математических методов. В результате предварительных исследований было принято решение получить расходные характеристики парлифтного нагнетателя экспериментальным путем.

В третьем разделе диссертации изложены результаты экспериментальных исследований безмашинного нагнетателя на основе парлифта. Как показали исследования, в установках обогащения криптоноксеноновой смеси парлифтная ступень используется в следующих случаях:

- слишком низкое давление исходной смеси, поступающей в установку (0,11...0,13 МПа), недостаточное для компенсации потерь в аппаратах системы обогащения;
- недостаточный уровень в столбовом конденсаторе;
- существует необходимость интенсифицировать тепломассообменные процессы в установке.

В 2011-2013 гг. на кафедре криогенной техники Одесской национальной академии пищевых технологий был разработан стенд для исследования работы парлифтного нагнетателя в области низких температур (77,4...80 К). Изготовление деталей, сборка и испытания были проведены на технической базе предприятия ООО «Айсблик» (г. Одесса). В качестве рабочего тела был выбран жидкий азот вследствие его безопасности для окружающей среды, безвредности для человека и относительно низкой стоимости.

Объемное паросодержание

$$\varphi = \frac{1,08 Q_{вн}}{d^2 r \rho_{п} \sqrt{\sigma g \frac{\rho_{ж} - \rho_{п}}{\rho_{ж}^2}}}, \quad (4)$$

где  $Q_{вн}$  – внешняя тепловая нагрузка, Вт;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $r$  – теплота испарения исследуемого вещества, кДж/кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

2. Уровень поднятия парожидкостной смеси превышает длину подъемной трубы ( $h > h_{CC}$  или  $(H+h) > L$ ). Выше подъемного участка жидкость отделяется от пара и может быть подана в другие аппараты системы сепарации.

Попытка получения аналитического выражения при  $(H+h) > L$ , связывающего расход жидкости через парлифт с количеством подводимой в единицу времени теплоты  $Q_{вн}$  и уровнем поднятия жидкости в напорной трубе  $h_{CC}$ , привела к появлению достаточно сложных трансцендентных уравнений, решение

Безмашинный нагнетатель, функционирующий на криогенном уровне температур, устроен следующим образом (рис. 5): левый сосуд 1 диаметром 80 мм и высотой 4 м соединен с правым (напорным участком) вентилем 3. Зона подвода тепла представляет собой емкость диаметром 80 мм и высотой 350 мм со встроенными ТЭНами 4. На крышке емкости размещен узел для подключения труб различного диаметра (8-16 мм). Особенности стенда являются:

- установка работает при атмосферном давлении;
- конструкция предусматривает возможность замены подъемного участка, полная длина которого составляет 6 м;
- тип пористой изоляции – Армафлекс, ее толщина  $\delta = 80$  мм;
- жидкий азот подается из криоцилиндра 11, размещенного рядом с нагнетателем.

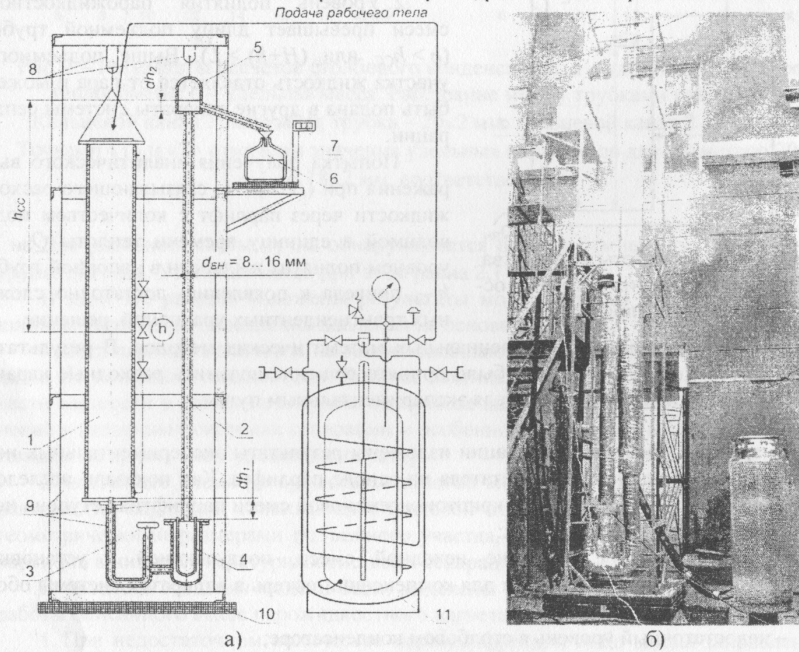


Рис. 5 – Схема (а) и внешний вид (б) установки для исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя: 1 – питающий сосуд диаметром 80 мм; 2 – подъемный участок трубы; 3 – вентиль, соединяющий сосуды; 4 – источник внешнего тепла (ТЭНы); 5 – сепаратор; 6 – сосуд Дьюара; 7 – электронные весы (малые); 8 – подвески; 9 – низкотемпературная теплоизоляция; 10 – электронные весы (большие); 11 – источник рабочего тела (криоцилиндр)

Поскольку исследования проводились в области низких температур, перед началом экспериментов была произведена оценка величины теплопритоков к установ-

ке для учета их влияния на расходные характеристики устройства. Результаты показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

На втором этапе исследовали зависимость расходных характеристик при переменном (убывающем) уровне жидкости в питающем сосуде 1. Для этого подачу жидкого азота из криоцилиндра 11 закрывали и фиксировали изменение массы сосуда Дьюара 6 в равные промежутки времени. Таким образом, был вычислен массовый расход вещества  $G_{Ж} = (dm/dt)$ . При этом  $h_{CC}$  определялось как разность длины подъемного участка 2 и уровня сплошной жидкости в питающем сосуде 1. Расходные характеристики  $G_{Ж} = f(h_{CC})$  при переменном уровне представлены на рис. 6 (линия 1). Характеристика получена при нулевой мощности электронагревателей  $Q_{ВН} = 0$ , когда испарение азота достигалось исключительно за счет теплопритоков через изоляцию подъемной трубы 2.

Повторение операций с подводом теплоты  $Q_{ВН}$  позволило построить набор расходных характеристик парлифтного нагнетателя (см. рис. 6, а, линии 2-3, рис. 6, б, линии 2-5). Анализ результатов показал, что в исследованном интервале геометрических параметров для одинаковой суммарной нагрузки  $Q_{\Sigma}$  с уменьшением диаметра подъемного участка расход жидкости уменьшается, а напор  $h_{CC}$  (или  $\Delta P$ ), обеспечиваемый нагнетателем, увеличивается.

На рис. 7 представлены расходные характеристики в виде зависимости  $G_{Ж} = f_2(Q_{\Sigma}, h_{CC})$ . Из диаграмм следует, что для каждого диаметра трубы и фиксированного значения напора  $h_{CC}$  существует оптимальное значение тепловой нагрузки, при которой расход через напорный участок будет максимальным. Например, для диаметра 10 мм (рис. 7, а, кривая 3) и  $h_{CC} = 480$  см это  $Q_{\Sigma} = 130$  Вт. При этом значение расхода достигает величины 0,35 кг/мин.

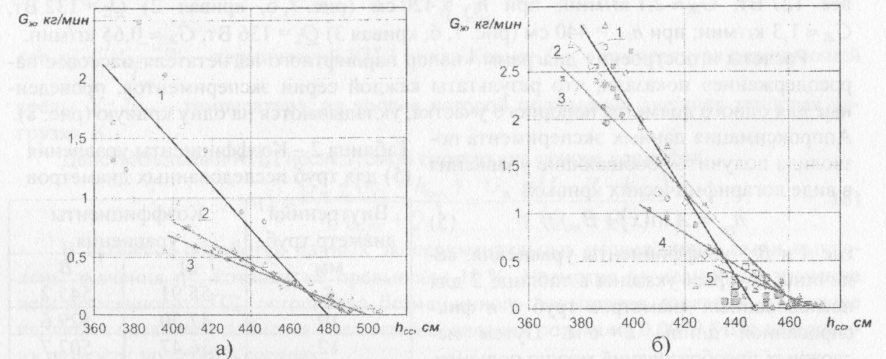


Рис. 6 – Расходные  $G_{Ж}-Q-h_{CC}$ -характеристики парлифта для труб с внутренними диаметрами 10 (а) и 16 мм (б):  $Q_{ВН}$  – внешняя нагрузка, Вт;  $Q_{\Sigma}$  – суммарный тепловой поток с учетом теплопритоков, Вт; а (линия 1) –  $Q_{ВН} = 0$  ( $Q_{\Sigma} = 121,7$ ); (линия 2) – 2,6 (124,3); (линия 3) – 15,3 (137); б (линия 1) –  $Q_{ВН} = 0$  ( $Q_{\Sigma} = 127,3$ ); (линия 2) – 5,4 (132,7); (линия 3) – 9,0 (136,3); (линия 4) – 14,7 (142); (линия 5) – 40,0 (167,3)

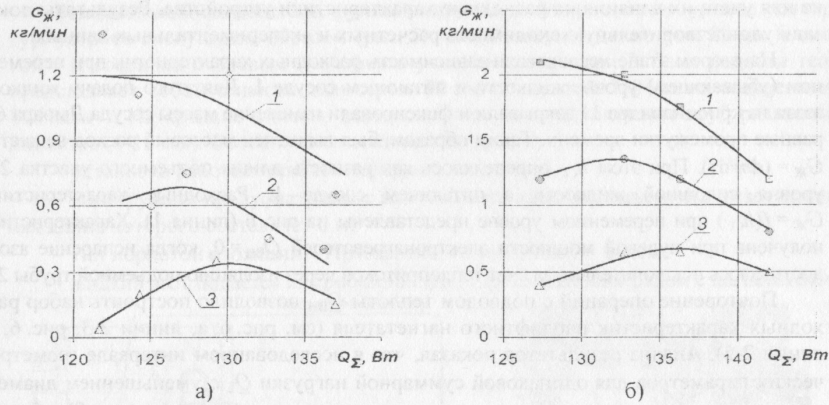


Рис. 7 – Расходные  $G_{ж}$ - $Q_{с}$ - $h_{сс}$ -характеристики парлифта в координатах  $Q_{с}$ - $G_{ж}$  для труб диаметром  $d = 10$  мм (а) и  $d = 16$  мм (б). Обозначения: а: 1 –  $h_{сс} = 400$ ; 2 – 440; 3 – 480 см; б: 1 –  $h_{сс} = 400$ ; 2 – 420; 3 – 440 см

Для  $h_{сс} < 400$  см (рис. 7, а, кривая 1) оптимум находится левее  $Q_{с} = 125$  Вт, а расход  $G_{ж} \approx 1,2$  кг/мин; для  $h_{сс} = 440$  см (рис. 7, а, кривая 2)  $Q_{с} = 127$  Вт, расход  $G_{ж} \approx 0,7$  кг/мин.

Для диаметра 16 мм и  $h_{сс} = 400$  см (рис. 7, б, кривая 1) оптимум находится левее 127 Вт,  $G_{ж} \approx 2,1$  кг/мин; при  $h_{сс} = 420$  см (рис. 7, б, кривая 2)  $Q_{с} = 132$  Вт,  $G_{ж} \approx 1,3$  кг/мин; при  $h_{сс} = 440$  см (рис. 7, б, кривая 3)  $Q_{с} = 136$  Вт,  $G_{ж} \approx 0,65$  кг/мин.

Расчеты и построения диаграмм «напор парлифтного нагнетателя-массовое паросодержание» показали, что результаты каждой серии экспериментов, проведенные для одного диаметра напорного участка, укладываются на одну кривую (рис. 8). Аппроксимация данных эксперимента позволила получить обобщающие уравнения в виде логарифмических кривых:

$$h_{сс} = A \ln(x) + B, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты уравнения, величины которых указаны в таблице 2 для исследованных диаметров труб  $d$  и фиксированной длины  $L = 6$  м. Путем несложных преобразований можно получить выражение для величины тепловой нагрузки, которая может обеспечить заданные напор и расход через парлифтный нагнетатель.

$$Q_{с} = G_{ж} r [\exp(A - h_{сс} + B) - 1]^{-1} = G_{ж} r [\exp(A - L + H + B) - 1]^{-1}. \quad (6)$$

Полученное выражение позволяет определить величину тепловой нагрузки при заданных напоре и расходе через парлифтный нагнетатель (длине напорного участка

Таблица 2 – Коэффициенты уравнения (5) для труб исследованных диаметров

Внутренний диаметр труб, мм	Коэффициенты уравнения	
	$A$	$B$
8	55,91	545,2
10	47,30	529,6
12	36,47	507,7
16	25,39	373,6

и уровня жидкости в левом сосуде) при условии, что известна расходная характеристика парлифта  $h_{сс} = f_3(x)$ , полученная экспериментально при фиксированных геометрических параметрах напорного участка парлифтного нагнетателя.

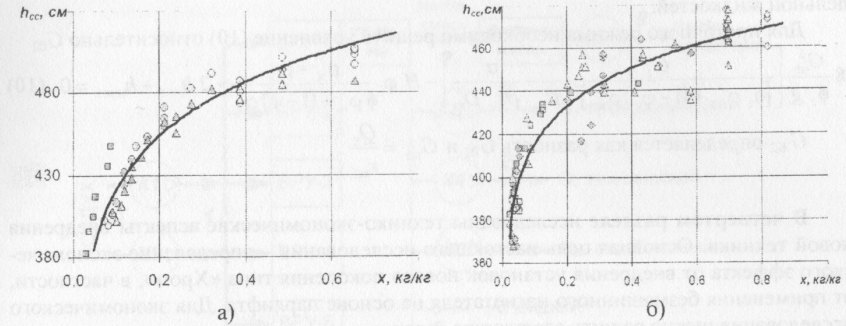


Рис. 8 – Влияние массового паросодержания в трубе на напор, создаваемый за счет подвода теплоты: а –  $d = 10$  мм;  $\square$  –  $Q_{с} = 121,7$ ;  $\Delta$  – 124,3;  $\circ$  – 137 Вт; б –  $d = 16$  мм  $\square$  –  $Q_{с} = 127,3$ ;  $\diamond$  – 132,7;  $\Delta$  – 136,3;  $\blacksquare$  – 142 Вт

КПД идеализированного парлифтного нагнетателя, используемого в качестве струйного насоса,

$$\eta_{ид} = \frac{G_{ж} g h_{сс}}{\eta_r Q_{с}}, \quad (7)$$

где  $\eta_r = \frac{T_{ос} - T_{вн}}{T_{ос}}$  – термический КПД цикла Карно;  $T_{ос}$  – температура окружающей среды, К;  $T_{вн}$  – температура, на уровне которой подводится внешняя тепловая нагрузка, К.

Действительный КПД исследуемой системы на основе парлифта

$$\eta^д = \frac{G_{ж} g (h_{сс} - h_{пот})}{\eta_r (Q_{вн} + Q_t)} = \frac{G_{ж} g (L - H - h_{пот})}{\eta_r (Q_{вн} + Q_t)}. \quad (8)$$

В процессе обработки данных экспериментальных исследований были вычислены значения  $\eta^д$ , которые не превышали 10%. Несмотря на невысокое значение действительного КПД, устройство безмашинного повышения давления на основе парлифта позволяет добиться увеличения давления потока на 0,0079 МПа на единицу разности уровней в сосудах.

Особенно эффективен парлифтный нагнетатель на уровне температур ниже окружающей среды, где подвод теплоты не требует дополнительных энергозатрат.

Переход на криптоноксеноновую смесь на основе кислорода будет сопровождаться изменением напорно-расходных характеристик парлифта, связанных с изменением теплофизических свойств рабочего вещества. Например, для режима  $(H+h) < L$  уровень поднятия жидкости в той же самой трубе

$$h_{r,2} = h_{cc1} \frac{\varphi_2 (\rho_{ж2} - \rho_{п12}) (1 - \varphi_1) \rho_{ж1} + \varphi_1 \rho_{п11}}{\varphi_1 (\rho_{ж1} - \rho_{п11}) (1 - \varphi_2) \rho_{ж2} + \varphi_2 \rho_{п12}} \quad (9)$$

при одном и том же значении тепловой нагрузки  $Q_{ВН}$  и уровне в хранилище  $H$ , является функцией соотношения только теплофизических свойств исследуемой и модельной жидкостей.

Для проточного режима необходимо решить уравнение (10) относительно  $G_{O_2}$

$$8 \frac{G_{O_2}^2}{\varphi_2 g} \left[ \frac{\alpha_2}{[\varphi_2 \rho_{п12} + (1 - \varphi_2) \rho_{ж2}] d^4} - \frac{\alpha_2}{\rho_{ж2}^2 D^4} \right] - H \varphi \frac{\rho_{ж} - \rho_{п}}{\varphi \rho_{п11} + (1 - \varphi) \rho_{ж}} + 2 h_{r,2} + h_{пЮ2} = 0, \quad (10)$$

$G_{ж2}$  определяется как разность  $G_{O_2}$  и  $G_{п12} = \frac{Q_2}{r_{ж2}}$ .

В четвертом разделе исследованы технико-экономические аспекты внедрения новой техники. Основная цель настоящего исследования – определение экономического эффекта от внедрения установок нового поколения типа «Хром», в частности, от применения безмашинного нагнетателя на основе парлифта. Для экономического исследования нужно решить следующие задачи:

- определение капитальных вложений и эксплуатационных затрат на внедрение установок нового типа;
- расчет себестоимости криптоноксеноновой смеси, получаемой в установках «Хром-3»;
- анализ статей затрат в себестоимости продукции с целью поиска путей их снижения;
- определение доли исходной криптоноксеноновой смеси в общих затратах на эксплуатацию установки обогащения. Для реализации этой задачи необходимо рассчитать себестоимость указанной смеси в условиях получения нескольких целевых продуктов разделения воздуха (кислорода, азота, аргона, криптоноксеноновой и неонгелиевой смесей);
- расчет экономии энергоресурсов и фонда зарплаты от внедрения безмашинного нагнетателя взамен сжатия исходной смеси в компрессоре.

Вначале были исследованы методы определения себестоимости газов в случае производства нескольких продуктов, в частности, криптоноксеноновой смеси, получаемой в виде побочного продукта разделения воздуха. В качестве объекта исследования выбрано кислородное производство крупного металлургического предприятия (рис. 9).

Полная заводская себестоимость единицы продукции определялась по формуле:

$$S_{п} = S_2 + S_A + S_3 + S_{ц} + S_{O_3}, \text{ грн./м}^3, \quad (8)$$

где  $S_2$  – удельные затраты энергии (электроэнергия, пар и вода на технические нужды) на его получение;  $S_A$  – удельные амортизационные отчисления;  $S_3$  – заработная плата персонала, обслуживающего установку, отнесенная к единице продукции;  $S_{ц}$  – удельные цеховые затраты;  $S_{O_3}$  – удельные общезаводские затраты.

Для анализа себестоимости был выбран «энергетический» метод расчета себестоимости, разработанный на основе работ В.М. Бродянского. Метод предусматривает распределение затрат между продуктами не только в соответствии с их объем-

ными расходами, но и учитывает состояние потоков на выходе установки (концентрация, отклонение от параметров окружающей среды и т. п.).

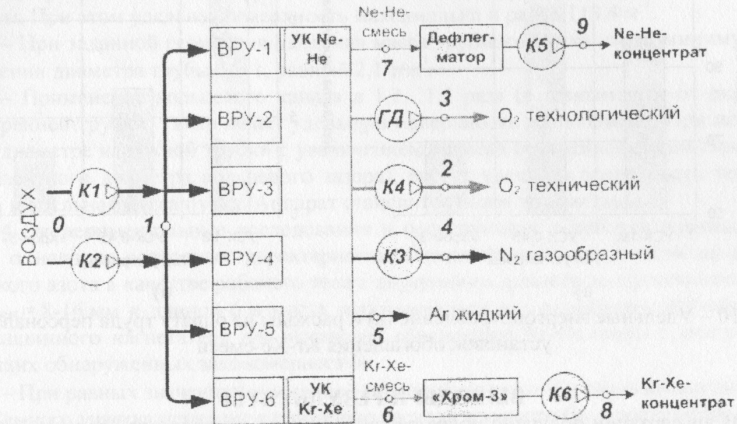


Рис. 9 – Упрощенная схема кислородного производства: УК Не-Не и УК Kr-Xe – установки концентрирования неонгелиевой и криптоноксеноновой смесей, соответственно; K1-K5 – компрессоры; ГД – газодувка

Анализ полученных результатов показал, что основной вклад в себестоимость вносят энергетические затраты: электроэнергия на привод оборудования, расход пара на обеспечение работы установки и воды на технические нужды. Второй по величине статей расходов являются общепроизводственные затраты. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО) в сумме составляют около половины общепроизводственных затрат. Вклад фонда оплаты труда в себестоимость Kr-Xe-смеси не превышает 5% в зависимости от уровня зарплат, принятого в металлургической отрасли.

Основной статьей расходов на получение концентрата в установке «Хром-3» являются энергетические затраты (60%), включающие потребление жидкого азота (источник холода), сжатого воздуха (источник тепла), электроэнергии (сжатие Kr-Xe концентрата) и воды. Затраты на оплату труда составляют около 17%. Доля исходной Kr-Xe-смеси в себестоимости 1 м<sup>3</sup> концентрата – всего 9% от общих затрат на его получение.

Оценка эффективности использования безмашинного нагнетателя в установках обогащения криптоноксеноновой смеси произведена на основании анализа удельного энергопотребления близких по производительности установок типа УСК-1М, УСК-0,45 и «Хром-3». Общий экономический эффект от внедрения безмашинного устройства повышения давления на основе парлифта (рис. 10) складывается из экономии энергии на сжатие в компрессоре (меньше, чем для УСК-0,45 в 1,6 раза) и экономии средств на оплату персонала (в 1,5 раза меньше).

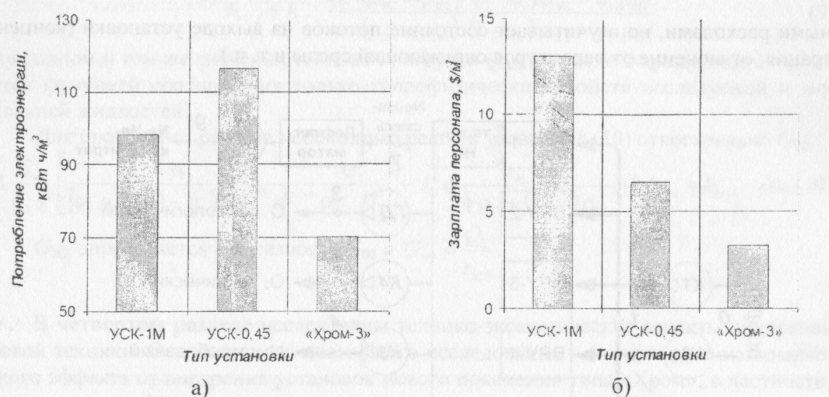


Рис. 10 – Удельные энергопотребление (а) и расходы на оплату труда персонала (б) установок обогащения Кг-Хе-смеси

### ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации получено новое решение научно-практической задачи, направленной на повышение эффективности криогенных установок, в частности, установок для обогащения первичной криптоноксеноновой смеси. На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы и рекомендации.

1. Наиболее затратным этапом в технологической последовательности получения криптона и ксенона из воздуха является обогащение первичной криптоноксеноновой смеси, получаемой на ВРУ. Для снижения удельного энергопотребления установок обогащения требуется неуклонно повышать эффективность и экономичность сепараторов путем применения более совершенных схемных и конструкторских решений, рациональной организации тепло- и массообменных процессов, учета изменяющихся в установке составов смесей и их термодинамических свойств.

2. Среди возможных типов кожухотрубных рекуперативных теплообменников, которые оцениваются по трем критериям (поверхность теплообмена; сопротивление в межтрубном пространстве; металлоемкость), лучшими для работы в установках обогащения тяжелых инертных газов являются прямотрубные аппараты с оребренными проволокой трубками. У этих аппаратов поверхность теплообмена и сопротивление газу в межтрубном пространстве значительно ниже. Наиболее эффективным для применения в установке оказался U-подобный теплообменник из 27-ми оребренных труб диаметром 12 мм, заключенных в кожух диаметром 80 мм.

3. Для создания эффективного конденсатора-испарителя с круговой или кольцевой формой конденсационного канала (в перпендикулярном сечении) для применения его в установке обогащения криптоноксенонового концентрата необходимо использовать следующие конструктивные решения и результаты расчетных исследований, повышающих интенсивность теплопередачи между потоками сред и способствующих уменьшению массы и габаритов аппарата:

– В пучке из одиночных труб удельная поверхность теплообмена не зависит от

числа труб. При этом шахматное расположение труб в пучке более эффективно, чем коридорное и радиальное.

– Для шахматного пучка указанный параметр уменьшается с ростом диаметра канала и расстояния между трубами. Для одиночных труб  $\varnothing 8 \times 1$  мм наблюдается оптимум. При этом удельная поверхность максимальна и равна  $113,4 \text{ м}^2$ .

– При заданной геометрии удельная масса трубного пучка имеет минимум при значении диаметра трубы  $14 \times 1$ , равный  $2,1 \text{ т/м}^3$ .

– Применение кольцевого канала в 1,2...1,5 раза (в зависимости от диаметра внутренней трубки) увеличивает удельную поверхность теплообмена. При постоянном диаметре наружной трубки с увеличением размера внутренней (уменьшения эквивалентного диаметра кольцевого зазора), растут удельная поверхность теплообмена и удельная масса пучка. Аппарат становится более компактным.

4. Экспериментальные исследования и последующая обработка опытных данных о напорно-расходных характеристиках парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота в качестве рабочего тела с внутренним диаметром подъемного участка  $d_{\text{вн}} = 8-16$  мм и длиной 6 м могут использоваться для разработки эффективного безмашинного нагнетателя для установок обогащения Кг-Хе-смеси с учетом следующих обнаруженных закономерностей:

– При равных значениях суммарной тепловой нагрузки  $Q_{\Sigma}$  уменьшение диаметра подъемного участка приводит к снижению расхода жидкости  $G_{\text{ж}}$  и росту напора  $h_{\text{гс}}$ .

– Для каждого диаметра трубы и постоянного напора существует оптимальное значение тепловой нагрузки, при которой расход через подъемный участок будет максимальным.

– Данные экспериментов, проведенных при фиксированных значениях геометрических параметров (диаметра и высоты напорного участка), в координатах  $h_{\text{гс}} = f(x)$  ложатся на одну кривую. Аппроксимация экспериментальных данных зависимостью  $h_{\text{гс}} = A \ln(x) + B$  дает возможность получить выражение для расчета величины тепловой нагрузки, требуемой для обеспечения заданных напора и расхода через парлифтный нагнетатель.

– Повышения расхода через парлифт при неизменном напоре можно добиться, увеличив площадь поперечного сечения правого сосуда путем пропорционального увеличения числа труб напорного участка.

5. Основной вклад в себестоимость побочных ПРВ вносят энергетические затраты: электроэнергия на привод оборудования, расход пара на обеспечение работы установки и воды на технические нужды. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования в сумме составляют около половины общепроизводственных затрат. Вклад фонда оплаты труда в себестоимость Кг-Хе-смеси не превышает 5% в зависимости от уровня зарплат, принятого в металлургической отрасли. Главной статьёй расходов на обогащение первичной криптоноксеноновой смеси и получение концентрата в установке типа «Хром-3» являются энергетические затраты (60%), включающие потребление жидкого азота, сжатого воздуха, электроэнергии и воды. Затраты на оплату труда составляют около 17%. Доля исходной Кг-Хе-смеси в себестоимости  $1 \text{ м}^3$  концентрата – всего 9% от общих затрат на его получение.

6. Внедрение безмашинного нагнетателя на основе парлифта в установке

«Хром-3» приводит к снижению удельных энергозатрат (в 1,6 раза относительно УСК) и удельных затрат на оплату труда персонала (примерно в 2,3 раза).

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Научные труды, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации:

1. Бондаренко В.Л. Совершенствование установок для извлечения тяжелых инертных газов [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Технические газы. – 2013. – № 5. – С. 25-34.

*Личный вклад: исследование технологий получения криптона и ксенона, патентный поиск в области установок обогащения Kr-Xe-смеси.*

2. Бондаренко В.Л. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Технические газы. – 2014. – № 1. – С. 24-31.

*Личный вклад: поиск установки-аналога для создания экспериментальной установки, описание стенда для исследования парлифтного нагнетателя, результаты исследований.*

3. Бондаренко В.Л. Установка для исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, О.В. Дьяченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 22-26.

*Личный вклад: описание конструкции установки для исследования парлифтного нагнетателя, результаты исследований.*

4. Бондаренко В.Л. Экономические аспекты получения и обогащения криптоноксеноновой смеси [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, Т.В. Дьяченко, О.В. Дьяченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 1. – С. 4-9.

*Личный вклад: поиск метода расчета себестоимости криптоноксеноновой смеси, получаемой в качестве побочного продукта ВРУ, результаты расчетных исследований.*

5. Бондаренко В.Л. Теплофизические свойства целевых и побочных продуктов в составе Kr-Xe-концентратов и рабочих тел в контурах обеспечения сепарации [Текст] / В.Л. Бондаренко, С.В. Артеменко, Е.Г. Корж // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 5 (151). – С. 61-68.

*Личный вклад: результаты расчетов свойств криптон и ксенон содержащих смесей на основе уравнения Редлиха-Квонга-Соава.*

#### Опубликованные труды апробационного характера:

1. Бондаренко В.Л. Современные технологии получения криптона и ксенона из воздуха [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОДАХ. – 2011. – С. 128-130.

2. Бондаренко В.Л. Современные установки в технологии получения криптона и ксенона из воздуха [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // V-я Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI

веке». Материалы конференции. – СПб. – 2011. – С. 70-71.

3. Бондаренко В.Л. Безмашинные методы повышения давления в технологии обогащения [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2012. – С. 129-131.

4. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для моделирования парлифта при температуре 77,4 К [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Приволжский научно-исследовательский центр. Сборник материалов первой международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы». – Йошкар-Ола, РФ. – 2012. – С. 53-54.

5. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для изучения работы парлифта [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2013. – С. 148-149.

6. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для изучения работы парлифта. Разработка методики испытаний [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Збірник тез доповідей IX-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2013. – С. 184-186.

7. Бондаренко В.Л. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2014. – С. 118-120.

8. Бондаренко В.Л. Экспериментальные исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, Т.В. Дьяченко // Международная конференция «Промышленные газы». – Москва, РФ. – 2014.

### АННОТАЦИЯ

**Корж Е.Г. Совершенствование технологических процессов в установках получения криптоноксенонового концентрата. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская национальная академия пищевых технологий, МОН Украины, Одесса, 2014 г.

Проведено исследование технологий получения тяжелых инертных газов (криптона и ксенона) из воздуха. Особое внимание было уделено этапу обогащения криптоноксеноновой смеси. Анализ известных технологий показал, что этот этап является наиболее энергозатратным.

Изучены витые и прямотрубные U-подобные кожухотрубные теплообменники, применяемые в установках обогащения Kr-Xe-смеси нового поколения для охлаждения прямого потока. В результате сравнительных исследований поверхности теплообмена, потерь давления в межтрубном пространстве и удельной металлоемкости доказано, что более эффективным типом из исследованных аппаратов являются

U-подобные теплообменники с оребренными проволокой трубками

Исследование конструктивных параметров прямотрубных конденсаторов-испарителей показало, что наиболее эффективным является шахматное расположение кольцевых каналов. Применение кольцевого канала в 1,2...1,5 раза (в зависимости от диаметра внутренней трубки) увеличивает удельную поверхность теплообмена.

Исследовано безмашинное устройство увеличения потенциальной энергии потока на основе парлифта. Создана экспериментальная установка для исследования нагнетателя с напорным участком трубы длиной 6 м и внутренним диаметром 8-16 мм в области низких температур. Получены его расходные  $G_{ж}-Q-h_{cc}-d$  и  $G_{ж}-x-d$ -характеристики на модельном веществе (жидком азоте) на температурном уровне 77,4...80 К. Обработка данных экспериментов позволила получить аналитическую зависимость тепловой нагрузки, необходимой для обеспечения заданных напора и расхода жидкости при известных геометрических параметрах напорной трубы.

Произведена оценка себестоимости криптоноксеноновой смеси, извлекаемой в качестве побочного продукта разделения воздуха. Расчеты показали, что основной вклад в себестоимость криптоноксеноновой смеси вносят энергетические затраты (70...80 % общих затрат). Общепроизводственные затраты и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования – 20...30 %. Вклад фонда оплаты труда в себестоимость Kr-Xe-смеси составляет от 2 до 5 % в зависимости от уровня зарплат, принятого в металлургической отрасли.

При обогащении первичной криптоноксеноновой смеси в установке типа «Хром-3» определяющими являются затраты энергии (60 %). Из них 7 % расходуется на сжатие производного криптоноксенонового концентрата. Оплата труда составляет около 17 % суммарных затрат. Доля исходной Kr-Xe-смеси в себестоимости 1 м<sup>3</sup> концентрата – около 9 % от общей суммы затрат на его получение.

Оценка эффективности использования безмашинного нагнетателя в установках обогащения криптоноксеноновой смеси, показала, что общий экономический эффект от внедрения безмашинного устройства повышения давления на основе парлифта складывается из экономии энергии на сжатие в компрессоре (меньше, чем для УСК-0,45 в 1,6 раза) и экономии средств на оплату персонала (в 1,5 раза меньше).

**Ключевые слова:** криптон; ксенон; обогащение; сепарация; ректификация; удельное энергопотребление; себестоимость продуктов разделения воздуха.

#### АНОТАЦІЯ

**Корж Є.Г. Вдосконалення технологічних процесів в установках отримання криптоноксенонового концентрату. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська національна академія харчових технологій, МОН України, Одеса, 2014 р.

Проведено дослідження технологій отримання важких інертних газів (криптон і ксенон) з повітря. Аналіз відомих технологій збагачення криптоноксеновмісної суміші показав, що цей етап є найбільш енерговитратним.

Вивчені системи теплохладопостачання установок сепарації і окремих апаратів,

витих U-подібних кожухотрубних теплообмінників-рекуператорів; конструкцій прямотрубних конденсаторів-випарників.

Створена експериментальна установка для дослідження безмашинного пристрою збільшення потенційної енергії потоку на основі парліфту з напірною ділянкою труби довжиною 6 м і внутрішнім діаметром 8-16 мм на модельній речовині (рідкому азоті). Визначені витратні  $G_p-Q-h_{\text{ст}}-d$  і  $G_p-x-d$  характеристики парліфтного нагнітача на температурному рівні 77,4...80 К. Отримана аналітична залежність теплового навантаження, необхідного для забезпечення заданих напору і витрати рідини при заданих геометричних параметрах напірної труби.

Розраховані складові собівартості криптоноксенової суміші, що отримується у ПРУ. Проведено аналіз витрат на виробництво криптоноксенового концентрату в установці типу «Хром-3» та ефективності використання безмашинного пристрою на основі парліфту.

**Ключові слова:** криптон; ксенон; збагачення; сепарація; ректифікація; питоме енергоспоживання; собівартість продуктів розділення повітря.

#### ABSTRACT

**Korzh E.G. Improvement of technological processes in the plants of Kr-Xe concentrate receiving. – Manuscript.**

Dissertation for the degree of the candidate of engineering sciences in the Specialty 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems. – Odessa national academy of food technologies, MES of Ukraine, Odessa, 2014.

They are studied of technologies for production of heavy rare gases (krypton and xenon) from the air. Analysis of the known enrichment technologies of Kr and Xe mixture is showed that this phase is the most energy-consuming.

They are investigated the systems of heat and cooling supply separation installations and separate devices. The optimization twisted and U-shaped shell and tube heat exchangers; design of straight-tube condensers-evaporators.

Experimental installation for research of non-machine device to increase the potential energy of the flow on the basis of vapor-lift with pressure portion of the pipe length of 6 m and an inner diameter of 8-16 mm in a model substance (liquid nitrogen). Defined consumables  $G-Q-h-d$  and  $G-x-d$  characteristics vapor-lift supercharger at a temperature level 77.4...80 K. The analytical dependence of the heat load required to ensure the specified pressure and flow rate at the given geometrical parameters of the standpipe.

The components of Kr-Xe mixture cost produced in the ASU are calculated. It is analyzed the cost of production of Kr-Xe concentrate in the installation type "Chromium-3" and effective of use the machineless device on the basis of vapor-lift.

**Keywords:** krypton; xenon; enrichment; separation; rectification; specific energy consumption; the cost of air separation products.