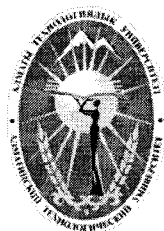


ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТИ  
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА  
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



V ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2015»  
V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2015»  
V INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE  
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2015»

Конференция баяндамаларының жинағы

19 ақпан, 2015 ж.

Сборник докладов конференции

19 февраля 2015 г.

Proceedings of the Conference

February 19, 2015

Алматы, 2015

УДК 621.56/59 (063)  
ББК 31.397  
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией доктора химических наук,  
академика **Кулажанова К.С.**

**Редакционная коллегия:**

Цой А.П., Кизатова М.Ж., Бараненко А.В.,  
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2015: Сборник докладов международной научно-технической конференции (19 февраля 2015 г.) – Алматы: АТУ, 2015. – 152 с.

ISBN 978-601-263-312-2

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых и специалистов Казахстана, Германии, России, Японии и Украины по направлениям: теплоснабжения, кондиционирования и экологии.

Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также гостиничном бизнесе и спортивных комплексах.

УДК 621.56/59(063)  
ББК 31.397

ISBN 978-601-263-312-2

©АТУ, 2015

УДК 676.026.1; 621.595

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПОРНО-РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПАРЛИФТНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ НА УРОВНЕ ТЕМПЕРАТУР 77...80 К**

<sup>1)</sup> В. Л. Бондаренко, д.т.н., <sup>2)</sup> Е. Г. Корж, аспирантка, <sup>2)</sup> Т. В. Дьяченко, к.т.н., докторант,  
<sup>3)</sup> О. В. Дьяченко, к.т.н.

<sup>1)</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Лефортовская наб.,  
д. 1, факультет «Энергомашиностроение», г. Москва, Россия

<sup>2)</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий, учебно-научный институт холода,  
криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, Одесса, Украина

<sup>3)</sup> ООО «Айсблик», г. Одесса, Украина

<sup>1)</sup> E-mail: [nadia@iceblick.com](mailto:nadia@iceblick.com), <sup>2)</sup> [liza1315@mail.ru](mailto:liza1315@mail.ru), [victory04@yandex.ru](mailto:victory04@yandex.ru) <sup>3)</sup> [diachenko-ov@yandex.ru](mailto:diachenko-ov@yandex.ru)

1. Введение. Получение инертных газов (гелия, неона, криптона и ксенона), как правило, осуществляется в несколько этапов в зависимости от типа источника сырья (фракции безопасности ВРУ, отдувочные газовые потоки химических производств и т.п.) и содержания в нем примесей. Этими этапами, согласно [1–3], являются:

- первичное концентрирование ценных компонентов;
- вторичное обогащение концентратов;
- разделение полученных смесей, например, Ne-He или Kr-Xe, для извлечения из них чистых продуктов.

Реализация процессов сепарации обеспечивается установками тепло- и хладоснабжения, которые нуждаются в энергии.

В технологии первичного обогащения тяжелых инертных газов часть расходов на извлечение криптоксеноновой смеси ложится на производство основного продукта разделения воздуха, например, кислорода. В результате удается содержание Kr и Xe в получаемой смеси довести до 0,2...0,5 %. Наиболее затратным является этап вторичного обогащения. Основные проблемы при его реализации – это возможность взрывоопасности [4], связанной с наличием углеводородов в смеси с таким сильным окислителем как кислород, и низкое давление потока, недостаточное для обеспечения технологического перепада давлений, который требуется в последующих операциях очистки.

Получение криптоксеноновой смеси до настоящего времени осуществлялось на устаревших установках типа УСК (установки сырого криптона), которые характеризуются относительно низкой эффективностью. Большинство подобных установок выработали свой ресурс. Для замены морально устаревших систем обогащения первичной криптоксеноновой смеси группой российских ученых (А.М. Архаров, М.Ю. Савинов; В.Е. Позняк; А.С. Бронштейн; Б.И. Волынский; В.Л. Бондаренко; Н.П. Лосяков) были разработаны установки нового поколения типа «Хром» [3, 5]. Одним из способов снижения эксплуатационных расходов указанных систем является отказ от использования компрессоров и переход к безмашинным способам повышения давления потока [3].

Объектом настоящего исследования является криогенный безмашинный нагнетатель, предназначенный для подъема жидкости за счёт энергии смешиваемого с ней пара. Цель исследований – определение напорно-расходных характеристик парлифтного нагнетателя, оценка его энергетической эффективности.

## 2. Экспериментальный стенд для исследования напорно-расходных характеристик парлифтного нагнетателя

Изучение литературных источников, посвященных работе парлифта [6–9], показало, что исследования подразделяются на две категории:

- интенсификация тепломассообменных процессов, увеличение скорости циркуляции в аппаратах с кольцевым движением потока (системы отопления, конденсаторы-испарители, петлевой поток ВРУ и т.п.);
- улучшение расходных характеристик (расхода и перепада давлений) при извлечении жидких полезных ископаемых из недр Земли.

2.1. Конструкция экспериментального стенда. Анализ информации, изложенной в литературе [7–9] показал, что самым близким аналогом безмашинного устройства для повышения потенциальной энергии потока является установка для исследования газлифта, созданная профессором В.Г. Багдасаровым [7]. Несмотря на огромный объем экспериментальных данных, все они были получены на модельной жидкости (воде) при температуре окружающей среды.

Исследования циркуляционных контуров на базе парлифта были проведены в 70-80-ых гг. в НПО «Криогенмаш» (г. Москва) [8, 9]. В качестве рабочих тел использованы вода при температуре окружающей среды (источник газа – воздух) и жидкий азот при температуре кипения (источник газовой фракции – испаритель). Эксперименты позволили определить резервы интенсификации теплообменных процессов в циркуляционных контурах конденсаторов-испарителей, петлевых потоков ВРУ и т.п. Наличие парлифтного участка значительно повышало скорость циркуляции жидкости, что, в свою очередь, вызывало увеличение коэффициента теплопередачи и позволяло уменьшить массогабаритные характеристики теплообменной аппаратуры.

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, рис. 1) [8, 9]. 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.

Безмашинный нагнетатель, функционирующий на криогенном уровне температур, устроен следующим образом (рис. 1): 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.

Выделим 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. Из-за этого система не является проточной, описанный режим практикуется в некоторых измерительных приборах.

2. Уровень поднятия парожидкостной смеси превышает длину подъемной трубы 2 (рис. 1). В сепараторе, расположенном выше подъемного участка, жидкость отделяется от пара и может быть подана в приемный сосуд 5, расположенный выше уровня  $H$  в питающем сосуде 1. При этом в сосуде 5 и ниже его (в сосуде Дьюара 6) будет сплошная среда. Таким образом, достигнутый перепад давлений буде равен

$$\Delta p = \rho_{ж} g h_{HH},$$

где:  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h_{HH}$  – разница уровней в сосудах (см. рис. 1), м;  $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}^2$  – ускорение свободного падения.

2.2. Методика экспериментальных исследований. Поскольку эксперименты проводились в области низких температур, перед их началом была произведена оценка величины теплопритоков к установке для учета их влияния на расходные характеристики устройства. Результаты показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

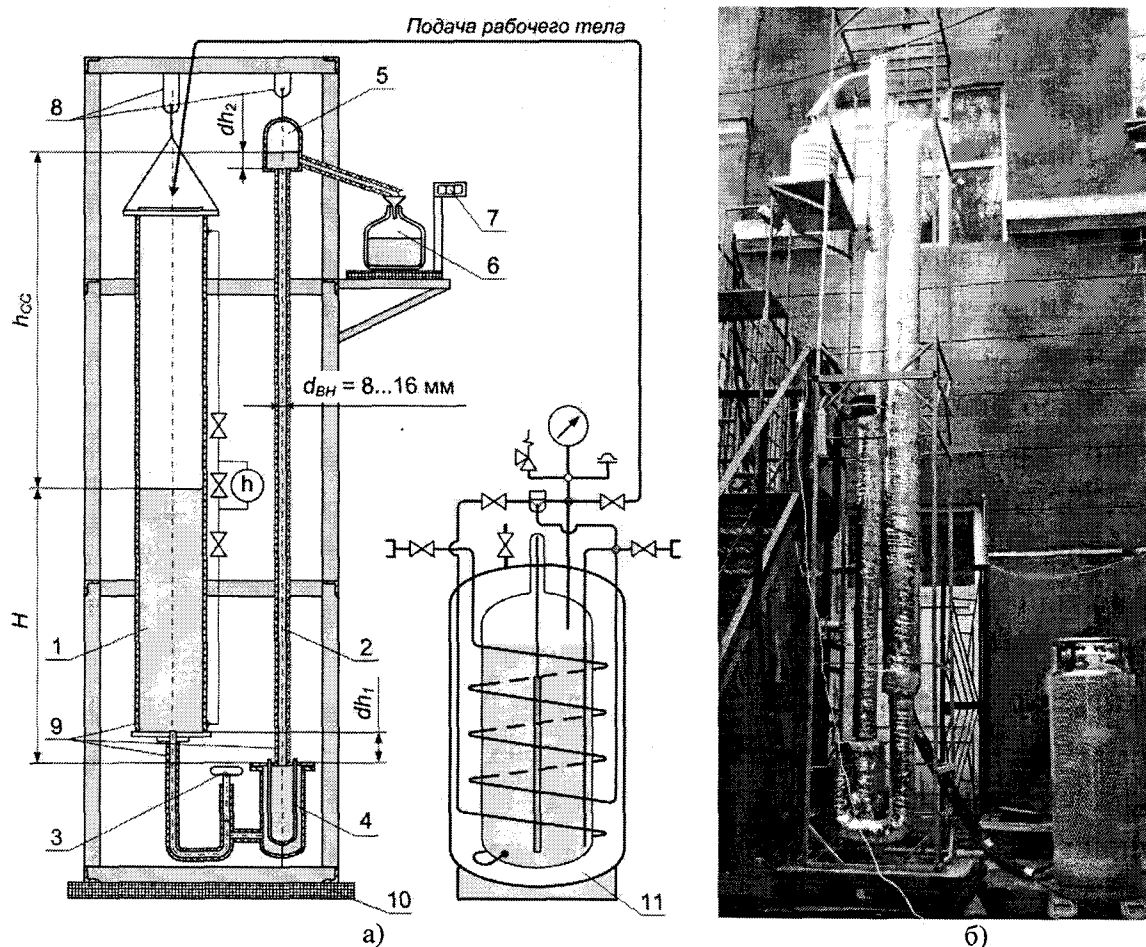


Рисунок 1 – Схема (а) и внешний вид (б) установки для исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя: 1 – питающий сосуд диаметром 80 мм; 2 – подъемный участок трубы; 3 – вентиль, соединяющий сосуды; 4 – источник внешнего тепла (ТЭНы); 5 – сепаратор; 6 – сосуд Дьюара; 7 – электронные весы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

На втором этапе были определены расходные характеристики устройства 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  $G_{ж} = (dm/d\tau)$ . 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. 2 (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. 2, а, линии 2-3, рис. 2, 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.

### 3. Результаты обработки экспериментальных данных

На рис. 3 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. 3, а, кривая 3) и  $h_{cc} = 480$  см это  $Q_{\Sigma} = 130$  Вт. При этом значение расхода достигает величины 0,35 кг/мин.

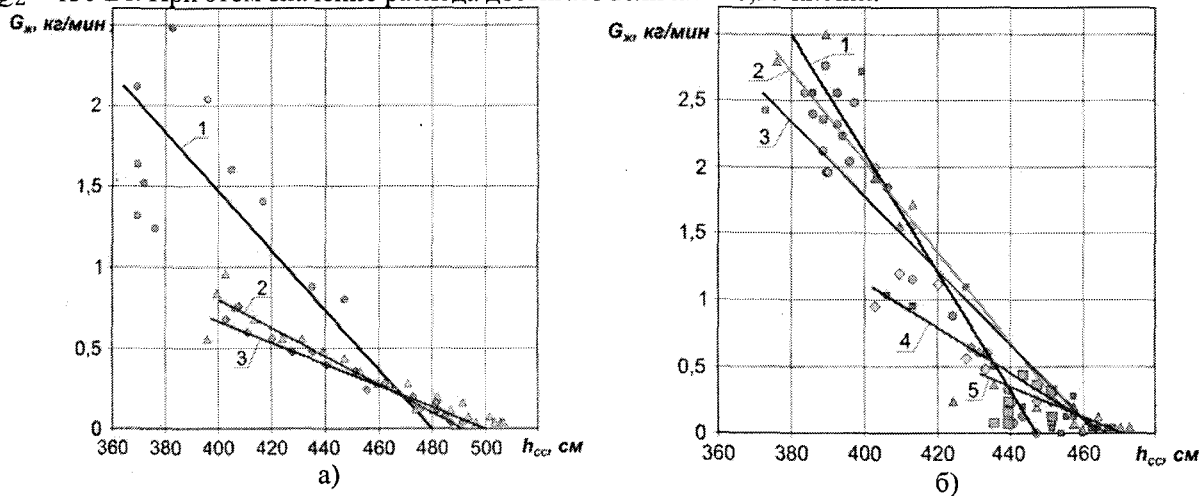


Рисунок 2 – Расходные  $G_{ж}-Q-h_{cc}$ -характеристики парлифта для труб с внутренними диаметрами 10 (а) и 16 мм (б):  $Q_{вн}$  – внешняя нагрузка, Вт;  $Q_{\Sigma}$  – суммарный тепловой поток с учетом теплопритоков, Вт; а (линия 1) –  $Q_{вн} = 0$  ( $Q_{\Sigma} = 121,7$ ); (линия 2) – 2,6 (124,3); (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)

Для  $h_{cc} < 400$  см (рис. 3, а, кривая 1) оптимум находится левее  $Q_{\Sigma} = 125$  Вт, а расход  $G_{ж} \approx 1,2$  кг/мин; для  $h_{cc} = 440$  см (рис. 3, а, кривая 2)  $Q_{\Sigma} = 127$  Вт, расход  $G_{ж} \approx 0,7$  кг/мин.

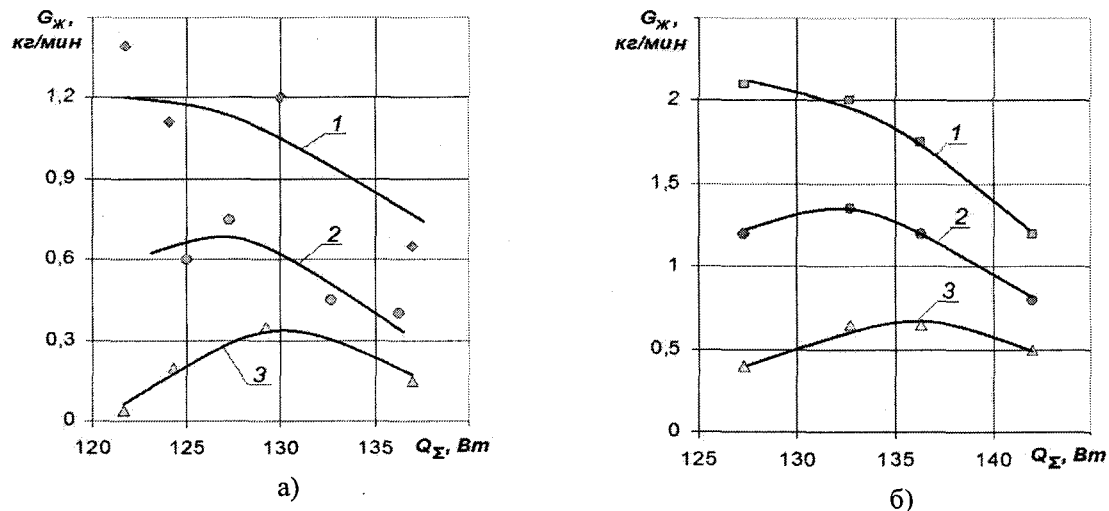


Рисунок 3 – Расходные  $G_{ж}-Q-h_{cc}$  - характеристики парлифта в координатах  $Q_{\Sigma}-G_{ж}$  для труб диаметром  $d=10$  мм (а) и  $d=16$  мм (б). Обозначения: а: 1 –  $h_{cc}=400$ ; 2 – 440; 3 – 480 см; б: 1 –  $h_{cc}=400$ ; 2 – 420; 3 – 440 см

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

Аппроксимация данных эксперимента позволила получить обобщающие уравнения в виде логарифмических кривых:

$$h_{cc} = A \ln(x) + B, \tag{1}$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты уравнения (табл. 1).

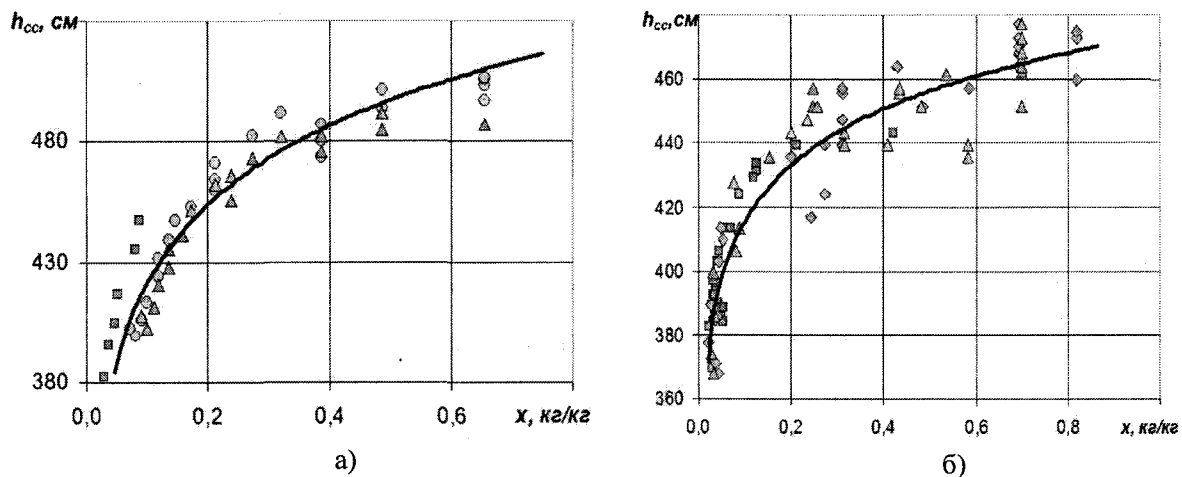


Рисунок 4 – Влияние массового паросодержания в трубе на напор, создаваемый за счет подвода теплоты: а –  $d=10$  мм;  $\blacksquare$  –  $Q_{\Sigma}=121,7$ ;  $\blacktriangle$  – 124,3;  $\bullet$  – 137 Вт; б –  $d=16$  мм;  $\blacksquare$  –  $Q_{\Sigma}=127,3$ ;  $\blacklozenge$  – 132,7;  $\blacktriangle$  – 136,3;  $\blacksquare$  – 142 Вт

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения (1) 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

Путем несложных преобразований можно получить:

$$Q_{\Sigma} = G_{ж} r [\exp(A - h_{cc} + B) - 1]^{-1} = G_{ж} r [\exp(A - L + H + B) - 1]^{-1} \tag{2}$$

Выражение позволяет определять величину тепловой нагрузки при заданных напоре и расходе через парлифтный нагнетатель (длине напорного участка и уровня жидкости в левом сосуде) при условии, что известна расходная характеристика парлифта  $h_{cc} = f_3(x)$ , полученная экспериментально при фиксированных геометрических параметрах напорного участка ( $d$  и  $L$ ).

3.4. Оценка энергетической эффективности. По определению, коэффициент полезного действия любого устройства или аппарата, равен отношению полезного эффекта, к затратам энергии на его реализацию. В случае парлифта полезной является мощность, развиваемая струйным насосом при подаче жидкости по напорному участку на высоту  $h_{cc}$  относительно уровня  $H$  в левом сосуде (обозначения – в соответствии с рис. 1)

$$N_i = G_{\text{ж}} g h_{\text{CC}} = G_{\text{ж}} g (L - H). \quad (3)$$

Затраченная мощность – это подведенная от нагревателя  $Q_{\text{ВН}}$  (без учета теплопритоков) на уровне погружения  $L = H + h_{\text{CC}}$ .

КПД идеализированного парлифтного нагнетателя, используемого в качестве струйного насоса,

$$\eta^{\text{EA}} = \frac{G_{\text{ж}} g h_{\text{CC}}}{\eta_i Q_{\text{AI}}}, \quad (4)$$

где  $\eta_i = \frac{T_{\text{ВН}} - T_{\text{AI}}}{T_{\text{OC}}}$  – термический КПД цикла Карно;  $T_{\text{OC}}$  – температура окружающей среды, К;

$T_{\text{ВН}}$  – температура, на уровне которой подводится внешняя тепловая нагрузка, К.

Действительный КПД исследуемой системы на основе парлифта

$$\eta^{\text{A}} = \frac{G_{\text{ж}} g (h_{\text{CC}} - h_{\text{ПО}})}{\eta_i (Q_{\text{AI}} + Q_{\text{O}})} = \frac{G_{\text{ж}} g (L - H - h_{\text{ПО}})}{\eta_i (Q_{\text{AI}} + Q_{\text{O}})}. \quad (5)$$

В процессе обработки данных экспериментальных исследований были вычислены значения  $\eta_{\text{д}}$ , 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 каждый метр разности уровней в сосудах.

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

Оценка эффективности использования безмашинной ступени повышения давления в установках обогащения криптоноксеноновой смеси произведена на основании анализа удельного энергопотребления близких по производительности установок типа УСК-0,45 и «Хром-3». Достоинствами «Хром-3» являются:

- установка не нуждается в отдельном здании и может располагаться в непосредственной близости от блока разделения;

- рабочее давление составляет 0,03...0,07 МПа (изб.);

- установка полностью автоматизирована.

Сравнивая установки УСК-0,45 и «Хром-3» можно отметить, что стоимость технологического оборудования этих установок приблизительно одинакова (несколько большая металлоемкость оборудования установки «Хром-3» ввиду низкого рабочего давления компенсируется стоимостью компрессорного оборудования УСК-0,45). Общий экономический эффект от внедрения безмашинного устройства повышения давления на основе парлифта складывается из экономии энергии на сжатие в компрессоре в 1,6 раза и экономии средств на оплату персонала в 1,5...2 раза (в зависимости от уровня оплаты труда, принятого на предприятии).

## 5. Заключение

Наиболее затратным этапом в технологической последовательности получения криптона и ксенона из воздуха является обогащение первичной криптоноксеноновой смеси, получаемой в процессе разделения воздуха. 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. Одним из способов снижения эксплуатационных расходов указанных систем является отказ от использования компрессоров для сжатия смеси, поступающей на вход установки сепарации, и переход к безмашинным способам повышения давления потока. Одним из вариантов такого устройства

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 Kr-Xe-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  $h_{\text{CC}}$ .

- 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  $h_{\text{CC}} = f(x)$  ложатся на одну

кривую. Аппроксимация экспериментальных данных зависимостью  $h_{CC} = A \ln(x) + B$  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.

– Внедрение безмашинного нагнетателя на основе парлифта в установке получения криптоноксеноновой смеси типа «Хром-3» приводит к снижению удельных энергозатрат (в 1,6 раза относительно УСК) и удельных затрат на оплату труда персонала (примерно в 1,5...2 раза).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головкин, Г. А. Установки для производства инертных газов / Г. А. Головкин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1974. – 383 с.
2. Бондаренко, В. Л. Криогенные технологии извлечения редких газов / В. Л. Бондаренко, Ю. М. Симоненко. – Одесса: Астропринт, 2013. – 332 с.
3. Бондаренко, В. Л. Совершенствование установок для извлечения тяжелых инертных газов / В. Л. Бондаренко, Ю. М. Симоненко, Е. Г. Корж // Технические газы. – 2013. – № 5. – С.25-34.
4. Файнштейн, В. И. Результаты мониторинга содержания углеводородов в технологических потоках жидкого кислорода ВРУ, оснащенных блоками комплексной очистки воздуха / В. И. Файнштейн // Технические газы. – 2008. – № 5. – С. 59-64.
5. Бондаренко, В. Л. Высокоэффективная установка «Хром-3» для получения криптоноксеноновой смеси / В. Л. Бондаренко, Н. П. Досяков, М. Ю. Савинов и др. // Технические газы. – 2005. – № 2. – С. 31-35.
6. Силаш, А. П. Добыча и транспорт нефти и газа / А. П. Силаш // Пер. с англ. – Часть I. – М.: Недра, 1980. – 375 с.
7. Багдасаров, В. Г. Теория, расчет и практика эрлифта / В. Г. Багдасаров. – М.: Гостоптехиздат, 1947. – 370 с.
8. Бондаренко, В. Л. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота / В. Л. Бондаренко, Ю. М. Симоненко, Е. Г. Корж и др. // Технические газы. – 2014. – № 1. – С. 24-31.
9. Бондаренко, В. Л. Установка для исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота / В. Л. Бондаренко, Е. Г. Корж, О. В. Дьяченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 22-26. doi: 10.1007/s10556-014-9899-5