

УДК 621.593

В.Л. Бондаренко, А.П. Графов*

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

*e-mail: grafov@iceblick.com

М.Ю. Куприянов, А.А. Кислый, А.С. Сирош

ООО «Айсблик», ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗОТОПА ^3He ИЗ ПРИРОДНОГО ГЕЛИЯ

Приведены результаты эксперимента по обогащению природного гелия изотопом ^3He методом фильтрования при температуре менее 2,1 К. Рассмотрены особенности применения низкотемпературной ректификации для разделения изотопов гелия. Изложены метод выбора и результаты численной оценки оптимальных параметров работы ректификационной колонны. Обоснован выбор степени обогащения в смежных этапах технологии получения изотопа ^3He из товарного гелия, исходя из минимума общих энергетических затрат на криостатирование. Выполнена оценка требуемой удельной холодопроизводительности средств криостатирования сверхтекучего гелия в установке получения изотопа ^3He из природного гелия.

Ключевые слова: Физика низких температур. Гелий. Изотопы гелия. ^3He . Фильтрование. Сверхтекучесть. Пористая перегородка. Ректификация. Промышленная установка. Насадка. Флегмовое число.

V.L. Bondarenko, A.P. Grafov, M.Yu. Kupriyanov, A.A. Kisliy, A.S. Sirosh

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF ^3He ISOTOPE EXTRACTING FROM NATURAL HELIUM

The results of experimental show the enrichment of natural helium isotope ^3He by filtering at a temperature less than 2,1 K. The features of application the low-temperature rectification are considered for separation of helium isotopes. The method of selection and the results of the numerical evaluation of the optimal parameters of work the distillation column are presented. The choice of the degree of enrichment in related stages of technology of reception the ^3He isotope out of commodity helium based on the minimum total energy costs of cryostatting is justified. The estimation of the required specific cooling capacity means cryostatting of superfluid helium in the installation receipt ^3He isotope from natural helium is performed.

Keywords: Low temperature physics. Helium. Helium isotopes. ^3He . Filtration. Superfluidity. Porous partition. Rectification. Industrial installation. Nozzle. Reflux ratio.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, сырьём для получения изотопа ^3He может быть природный гелий, являющийся естественной смесью изотопов ^4He и ^3He . Концентрация изотопа ^3He в гелии, который извлекают из природного газа, составляет, в среднем, 0,1–0,2 ppm, а в гелии, который извлекают из продуктов разделения воздуха, — 1,4 ppm. Чистый изотоп ^3He может быть получен традиционными методами низкотемпературной ректификации или адсорбции только из концентрата, в котором содержание изотопа ^3He должно быть в $10^3 \dots 10^4$ раз больше, чем в природном гелии. Наиболее эффективным методом получения такого концентрата из природного гелия является фильтрование последнего при температуре менее 2,1 К [1].

Известен опыт использования такого фильтрования и последующей ректификации для получения чистого гелия-3 из небольших количеств разбавленных растворов ^4He - ^3He в лабораторных условиях, для которых затраты на получение гелия-3 не имеют практического значения [2–4]. И, напротив, эти затраты являются главным критерием оценки возможности получения гелия-3 из природного гелия в промышленных масштабах.

Очевидно, что основную часть удельных затрат в данной технологии составляют затраты на термостатирование фильтра жидкого гелия и конденсатора ректификационной колонны на уровне ниже 2 К. Очевидно также, что эти затраты зависят как от тепловыделений в фильтре и в конденсаторе колонны, так и от выбора средств термостатирования.

В настоящей статье представлено обоснование выбора оптимальных параметров последовательных процессов фильтрования и ректификации в промышленной технологии извлечения изотопа ^3He из природного гелия. В качестве основного критерия такой оптимизации рассматривается сумма удельных тепловыделений в этих двух процессах.

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ

Рассматриваемый здесь принцип предварительного обогащения методом фильтрования состоит в охлаждении исходного гелия до температуры ниже 2,1 К, при которой происходит ожижение гелия, и последующей фильтрации примесей полученного жидкого гелия. При такой температуре основная часть жидкого гелия, состоящая из изотопа ^4He , становится сверхтекучей, т.е. способной без сопротивления перетекать через очень узкие каналы. Поскольку сечения каналов используемого нами фильтра менее 1 мкм, то через них перетекает, в основном, только сверхтекучий изотоп ^4He , а изотоп ^3He и другие примеси задерживаются фильтром. Так происходит концентрирование изотопа ^3He на входе в фильтр. Концентрат, накопленный таким образом, отводится из фильтра в хранилище или сразу подаётся в установку получения чистого ^3He . Этот способ обогащения бедной смеси изотопов ^4He - ^3He давно известен и используется в лабораторных целях [2-4].

Промышленная технология предварительного обогащения природного гелия, очевидно, должна быть экономичной, воспроизводимой и позволяющей перерабатывать большие объёмы сырья. В связи с этим создаваемая нами промышленная технология отличается от известных вариантов лабораторной технологии. В табл. 1 представлено описание этих отличий.

Как известно, параметры структуры пористой сверхщели (в данном случае — фильтра) значительно влияют на характер течения HeII в каналах этого устройства [5]. В частности, от распределения по размерам проточных пор зависят:

- значение критической плотности потока сверхтекучего гелия через фильтр, соответствующее верхней границе бездиссипативного режима этого течения;
- «паразитный» тепловой поток через стенку фильтра, вызванный течением нормальной (несверхтекучей) части ^4He (особенностью данного течения является зависимость вязкости этой части гелия от размеров каналов);
- перенос изотопа ^3He через каналы фильтра и, соответственно, эффективность самого процесса отделения изотопа ^3He от сверхтекучего изотопа ^4He .

Отсюда следует, что параметры структуры и размеры пористого фильтра не могут быть выбраны произвольно, а должны соответствовать заданным характеристикам установки: производительности и эффективности. Обеспечение этого соответствия в большей степени возможно, если в качестве материала

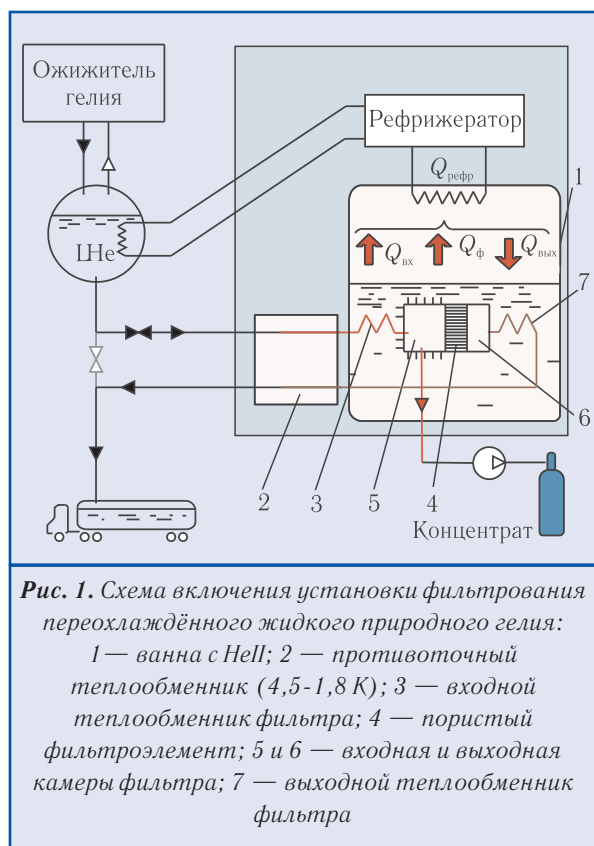
фильтра применена пористая керамика или другие современные пористые конструкционные материалы.

Таблица 1. Отличительные особенности промышленной технологии обогащения природного гелия изотопом ^3He от известных лабораторных аналогов

Способ обогащения	Известные аналогии прототипы	Создаваемая технология	Эффект замены
Фильтр	Прессованные тонкодисперсные порошки (пудры)	Пористая керамика, изготовленная из шмотно-бентонитовой смеси промышленным способом	Возможность выбирать и воспроизводить параметры структуры фильтра и его размеры
Рабочее давление	От 10 до 30 мм рт. ст., что соответствует давлению насыщенного пара при температуре менее 2,1 К	Выше атмосферного. Состояние жидкого гелия в коммуникациях фильтра соответствует состоянию недогретой (переохлаждённой) жидкости	Отсутствие капитальных и энергетических затрат, связанных с необходимостью применения вакуумных насосов на потоках рабочей среды
Способ фильтрации	Возбуждение движения сверхтекучего гелия путём создания градиента температуры на фильтре для использования термомеханического эффекта (ТМЭ)	Возбуждение движения сверхтекучего гелия путём создания градиента давления на фильтре для использования механокалорического эффекта (МКЭ)	Уменьшение значения удельных тепловыделений в фильтре. Смягчение требований к гидравлическому сопротивлению теплообменников рабочей среды

Практически во всех известных опубликованных предложениях схем и устройств фильтрования рассматриваемого бедного раствора изотопов гелия используется термомеханический эффект сверхтекучего ^4He [6-8]. Циркуляция сверхтекучего изотопа ^4He в устройстве возникает вследствие функционирования термомеханического насоса (ТМН), в состав которого входит пористый фильтр. При этом расход жидкого гелия через фильтр и напор насоса тем больше, чем выше мощность тепловыделений в нагревателе этого

насоса. Использование фильтрации переохлаждённого жидкого гелия позволяет отказаться от ТМН как средства циркуляции гелия в фильтре. В этом случае для организации течения сверхтекучего гелия через фильтр может быть достаточно перепада давлений между источником исходного гелия и приёмником гелия, очищенного от изотопа ^3He . Схема такого устройства изображена на рис. 1.



Представленный на рис. 1 способ включения фильтра позволяет извлекать изотоп ^3He попутно во время выполнения обычной процедуры перелива жидкого гелия из ожижителя в транспортную ёмкость. В этом случае нет необходимости в специальном рефрижераторе на 1,9 K, так как имеется возможность выноса тепла рефрижератора не на уровень окружающей среды, а на более низкий уровень 4,5 K, который обеспечивается ожижителем гелия.

Работоспособность описанной выше технологии фильтрации переохлаждённого жидкого гелия с использованием керамического фильтра была проверена в специальном эксперименте.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

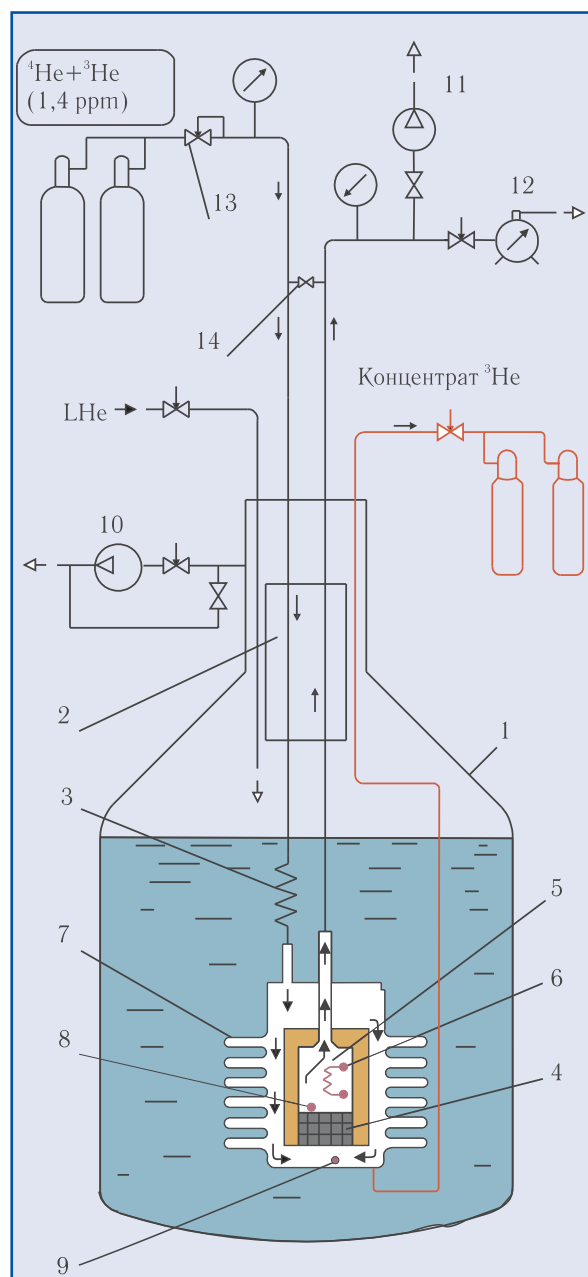
3.1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В качестве криостата 1 использовался стандартный сосуд Дьюара CMSH-250 компании «Cryofab». В нём размещены:

- входной рекуперативный противоточный теп-

лообменник 2 типа «труба в трубе», в котором холод обратного потока гелия (из фильтра) используется для охлаждения и конденсации гелия прямого потока;

- теплообменник 3 для компенсации недорекуперации первого теплообменника 2;
- теплообменник 7, внутренняя полость которого является накопителем концентрата.



В этой полости дьюара находятся фильтр 4 и тер-

морезистор 9. Корпус фильтра изготовлен из тефлона F-4. Стенки этого корпуса толщиной 5...7 мм выполняют функцию теплоизоляции выходной камеры фильтра 5, в которой расположены вспомогательный нагреватель 6 и терморезистор 8. Температуру жидкого гелия в криостате 1 поддерживали регулированием скорости откачки паров гелия насосом 10. В качестве исходного сырья использовали находящийся в баллонах сжатый газообразный гелий, полученный из неонгелиевой смеси — побочного продукта разделения атмосферного воздуха. Гелий, прошедший через фильтр (обратный поток), направляли в мягкий газгольдер. Таким способом обеспечивалось постоянство давления гелия на выходе из фильтра 9. Для контроля количества гелия, прошедшего через фильтр, использовали счётчик 12, установленный на этой линии сброса гелия в газгольдер.

Количество гелия, подаваемого на вход фильтра, определяли объёмным методом по изменению давления в баллонах с исходным гелием. Баллоны, в которые отводили накопленный концентрат, предварительно были откачаны. Количество собранного в них концентрата определяли также объёмным методом. Количество жидкого гелия в криостате во время эксперимента находили с помощью штатного уровнемера жидкого гелия и путём постоянного контроля массы криостата, установленного на электронных напольных весах. Фильтр выполнен из пористой керамики с известным распределением пор по размерам. Максимальный размер проточных пор фильтра составляет 0,3 мкм. Толщина стенки фильтра — 5 мм. Для измерения температуры жидкого гелия в криостате и в коммуникациях фильтра использовались полупроводниковые терморезисторы и соответствующий им вторичный показывающий прибор. Погрешность измерения температуры в диапазоне 1,5...5,0 К, согласно паспорту этой аппаратуры, составляет не более 0,01 К.

3.2. Описание эксперимента

Захлаживание фильтра и других аппаратов, размещённых внутри криостата, производили при заполнении его жидким гелием. При этом пары гелия из криостата отводили в газгольдер, с которым также соединены все коммуникации фильтра. По мере заполнения криостата жидким гелием происходила конденсация гелия, находящегося в затопленных частях коммуникаций фильтра. По окончании заполнения криостата жидким гелием и захлаживания оборудования, расположенного в нём, начинали откачку паров гелия из криостата с целью понижения температуры находящегося в нём жидкого гелия. При достижении температуры жидкого гелия 1,9 К были выполнены измерения скорости его испарения, которая составила 0,2 кг/ч. По результатам этих измерений определено значение «паразитного» (несвязанного с функционированием фильтра) теплопритока к жидкому гелию в криостате $Q_{\text{пар}} = 1,1$ Вт.

Затем была начата подача гелия в фильтр. Давление гелия на входе в теплообменник 2, избыточное по

отношению к давлению гелия на выходе из него, поддерживали с помощью газового редуктора 13. При этом исходный гелий охлаждался, конденсировался и переохлаждался в теплообменниках 2 и 3 и, достигнув температуры жидкого гелия в криостате, направлялся в фильтр. Температуры гелия в криостате, на входе в фильтр и в выходной камере фильтра были приблизительно равны 1,9 К и отличались друг от друга не более, чем на 0,02 К. Таким способом осуществлялся процесс фильтрации жидкого гелия, в результате которого происходило накопление изотопа ^3He во входной камере фильтра.

После прекращения процесса фильтрации следовала процедура концентрирования жидкого раствора изотопов ^4He и ^3He , находящегося во входной камере фильтра, заключающаяся в удалении изотопа ^4He из этого раствора. Для этого, поддерживая температуру жидкого гелия в криостате на уровне 1,8...1,9 К, включали нагреватель 6 в выходной камере фильтра и насос 11 для откачки паров гелия из коммуникаций обратного потока. По окончании этой процедуры медленно отогревали теплообменник 7 с находящимся в нём концентратом. При этом давление в теплообменнике соответственно увеличивалось, и концентрат перепускали из него в приготовленные баллоны.

3.3. Результаты эксперимента

В ходе экспериментов проводили измерения, которые дали следующие результаты:

- продолжительность процесса фильтрации — 19 ч 55 мин;
- изменение количества жидкого гелия в криостате в процессе фильтрации — 6,05 кг;
- количество гелия, поданного в фильтр — 13717 ндм³;
- количество собранного концентрата — 13,55 ндм³;
- средняя концентрация изотопа ^3He в концентрате — 1275 ppm;
- количество изотопа ^3He в собранном концентрате — 17,27 нсм³.

3.4. Результаты обработки эксперимента

Полученные в эксперименте данные использовались для определения следующих параметров:

- степень извлечения изотопа при его концентрации в сырье 1,4 ppm — 90 %;
- степень обогащения — 910;
- средний расход гелия-сырья в процессе фильтрации — 0,114 кг/ч;
- общий теплоприток к жидкому гелию в процессе фильтрации — 1,68 Вт.
- часть этого теплопритока, связанная с работой фильтра, — 0,58 Вт;
- удельная нагрузка на жидкий гелий, связанная с работой фильтра — 2,4 МДж/ндм³ гелия-3 (0,67 кВтч/ндм³);
- удельные энергетические затраты на привод вакуумного насоса ≈ 1200 кВтч/ндм³ гелия-3;
- сумма удельных затрат на привод насоса и

ожижение использованного гелия ≈ 2500 кВтч/ндм³ гелия-3.

4. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСЕЙ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ

4.1. Особенности ректификации смеси ⁴He-³He

Ректификация изотопов гелия, несмотря на принципиальную схожесть с ректификацией других инертных газов, имеет ряд особенностей, обусловленных следующими обстоятельствами:

- низким температурным уровнем этого процесса — необходимостью термостатирования конденсатора колонны при температуре 1,5...2,1 К, что требует относительно высоких энергетических затрат;
- высокой стоимостью товарного ³He, что вынуждает извлекать этот изотоп даже из бедных отходов рассматриваемого процесса ректификации;
- относительно низкими капитальными затратами на создание промышленной установки, которые существенно значительно меньше прибыли при непрерывной её эксплуатации в течение одного года.

В технологии извлечения изотопа ³He из природного гелия ректификацию применяют как один из этапов последовательного обогащения исходной смеси изотопов гелия. В этом случае ректификации подвергают продукт предварительного обогащения природного гелия — концентрат, в котором содержание изотопа ³He может составлять от 0,1 до 10 %.

4.2. Выбор параметров состояния рабочей среды в ректификационной колонне

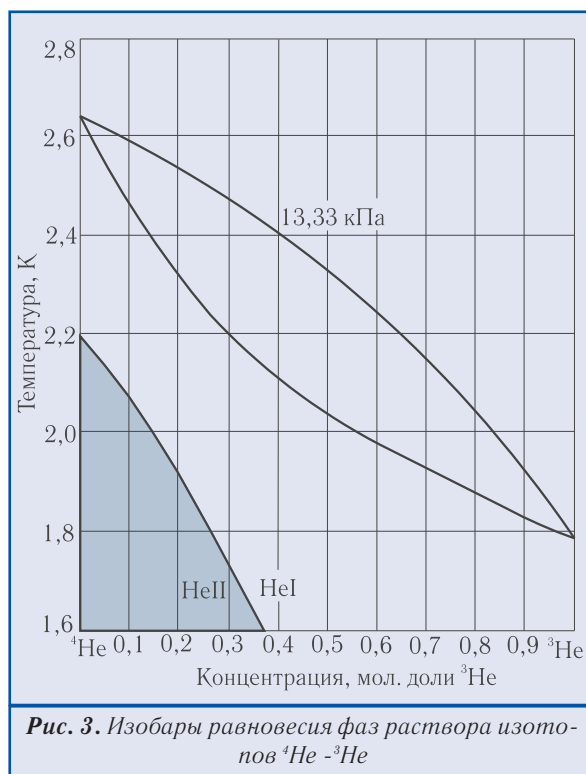
Значения параметров состояния рабочей среды в колонне могут быть выбраны, исходя прежде всего из условия обеспечения максимальной эффективности процесса ректификации, которая достигается при значительном расхождении изобар равновесия смеси изотопов ⁴He-³He. Этому условию соответствуют области значений давления в колонне от 7 до 20 кПа, температур в конденсаторе от 1,8 до 2,0 К (см. рис. 3).

4.3. Выбор типа насадки ректификационной колонны

Предварительный выбор типа насадки колонны может быть сделан на основании экспериментальных данных и результатов их анализа, содержащихся в работах [2,3,8,9].

Преимущества насадочной колонны перед безнасадочной были показаны в статьях Пешкова [2] и позже — других исследователей [8,9]. Авторы этих работ практически подтвердили преимущество насадочных колонн, добившись ВЕП=0,86 см и конечной чистоты продукта в 99,95 % при схожих размерах и параметрах колонн [2, 3]. Исходную смесь изотопов гелия подавали в ректификационную колонну, представлявшую собой трубку диаметром 9,6 мм и длиной 200 мм, наполненную колечками из константановой проволоки. Применялись также насадки спирально-призматического типа из окисленной меди и сетчатая насадка, упакованная слоями. Используя данные о работе лабораторных колонн, представленные в статьях

Кузьменко [9] и Вилкса [8], можно графическим методом определить ВЭТТ (высоту эквивалентную одной теоретической тарелке). В колонне диаметром 9 мм со спиральной насадкой ВЭТТ составляет приблизительно 23 мм [8].



4.4. Выбор режимов работы ректификационной колонны

Возможны следующие режимы работы колонны:

— Периодический режим, использованный в большинстве известных опытов, описанных выше, является наиболее простым и легко осуществимым в лабораторных условиях. При этом весь объём разделяемой смеси конденсируется в кубе и далее следует однократный процесс ректификации. Основным недостатком в этом случае является ухудшение чистоты продукта по мере его отбора и значительное количество остатка изотопа ³He в насадке и кубе колонны.

— Непрерывный режим требует наличия средств измерения и регулирования потоков рабочей среды колонны, что значительно усложняет конструкцию установки, методы управления работой установки и снижает её надёжность. Преимуществами режима является минимум потерь целевого продукта и, соответственно, высокий коэффициент его извлечения.

Выбор режима работы колонны может быть сделан, исходя из количества исходного сырья, подлежащего ректификации, и требований к скорости извлечения из него целевого компонента — изотопа ³He. Эти показатели можно определить, учитывая следующие данные:

— количество изотопа ³He, содержащегося во всем гелии, который производится несколькими гелиевыми заводами за один год, составляет около 30000 ндм³;

– средняя производительность одной из опробованных [8] ректификационных колонн составляет 5 дм³/ч изотопа ³He;

– в связи с рассредоточенным расположением в мире производств гелия среднее количество изотопа ³He, содержащегося в гелии, произведенном за год одним заводом, можно приблизительно оценить как 10³ ндм³.

Из этих данных можно заключить, что продолжительность работы ректификационной установки, предназначенной для извлечения изотопа ³He из сырья, производимого одним гелиевым заводом, составляет всего 200 ч в течение одного года. Следовательно, необходимость в непрерывном режиме работы рассматриваемой ректификационной установки может отсутствовать. В связи с этим выбор режима работы такой установки может быть сделан, исходя из требований к объёму каждой поставки товарного изотопа и к примесям в этом продукте с учётом каких-либо организационных, а не технических требований.

4.5. Затраты на термостатирование ректификационной колонны

Очевидно, что основные энергетические затраты связаны с необходимостью поддержания температуры жидкого гелия, являющего хладагентом, к которому передается теплота образования флегмы в конденсаторе колонны. Случаю низкой концентрации легкого изотопа в исходном сырье колонны соответствует увеличенное значение минимального флегмового числа

$$f_{\min} = (y_n - y_0) / (y_0 - x_0),$$

где n и 0 — соответственно, равновесные концентрации ³He в жидкости и газе продукта и начального сырья, направляемого в колонну на разделение.

Реальные значения флегмового числа в промышленной колонне могут достигать 200 и выше.

Таблица 2. Нагрузка на рефрижератор конденсатора колонны в Дж/ндм³ изотопа ³He в зависимости от его содержания в продукте x_k (%) и в сырье x_n (%) при температуре конденсатора 1,8 К

x_k	Концентрация ³ He в сырье x_n							
	0,1	1	5	10	15	30	50	80
99,9	11893	1189	228	108	69	29	14	6
99	11857	1185	227	108	68	29	14	5
90	11494	1147	219	104	65	27	12	3
80	11090	1106	210	98	61	24	10	
60	10282	1021	190	87	52	18	4	
40	9471	934	168	72	40			

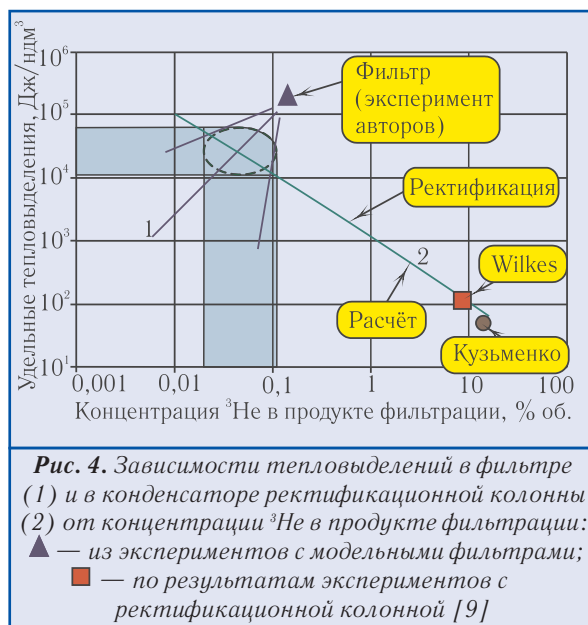
В табл. 2 представлены результаты расчётов удельной нагрузки на рефрижератор конденсатора колонны (энергии, которую необходимо отвести от конденсатора) при различных значениях концентрации изотопа ³He в сырье и в конечном (верхнем) продукте. Расчёты выполнены для условия, когда температура в

конденсаторе 1,8 К, давление в колонне 13 кПа. При расчётах полагались параметры насадки и диаметр колонны неизменными.

Выполненные численные оценки, конечно, приближительны. При расчётах не учитывали влияние заданных значений концентрации изотопа в сырье и конечном (верхнем) продукте на выбор температуры и давления среды в колонне, параметров насадки и на выбор размеров элементов колонны. Но даже такая оценка удельной работы конденсатора оказывается весьма полезной в выборе рациональной тактики использования ректификации в технологии получения чистого изотопа ³He.

Элементарный анализ процессов в такой колонне показывает, что значения удельных тепловыделений в конденсаторе обратно пропорциональны концентрации ³He в исходной смеси, а значения удельных тепловыделений в фильтре прямо пропорциональны этой концентрации, при прочих одинаковых условиях. То есть, чем больше концентрация ³He в продукте предварительного обогащения, тем больше удельные тепловыделения в фильтре и тем меньше удельные тепловыделения в конденсаторе ректификационной колонны.

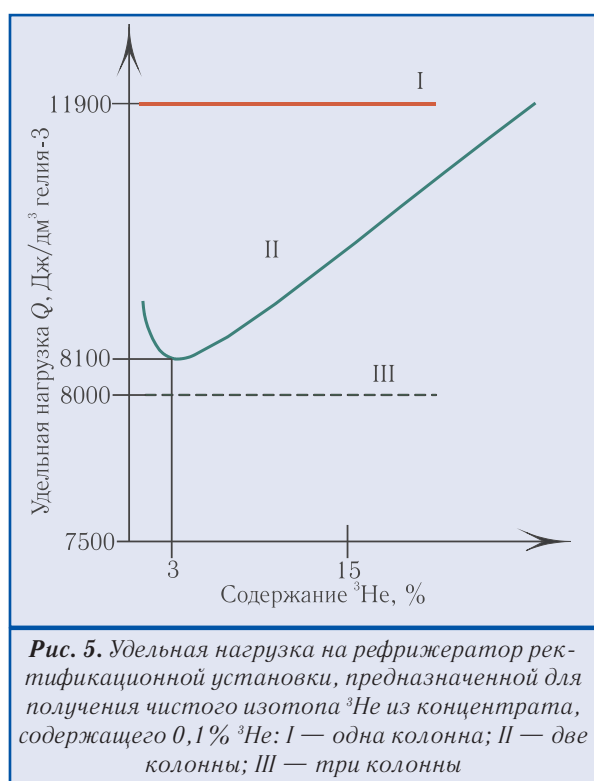
На рис. 4 представлен характер зависимостей удельных тепловыделений в фильтре, в колонне и суммы этих тепловыделений от концентрации ³He в продукте фильтрации. На этом рисунке пунктиром очерчена область оптимальных значений концентрации ³He и соответствующих им удельных тепловыделений.



Как видно из рис. 4, минимум суммы тепловыделений в фильтре и в ректификационной колонне приходится на диапазон 2·10⁴ ... 7·10⁴ Дж/ндм³, которому соответствует диапазон значений концентрации ³He в продукте фильтрации от 0,02 до 0,2 %.

При концентрации изотопа ³He в сырье 0,1 % степень обогащения в процессе ректификации соста-

вит ~1000. В этом случае при такой большой степени обогащения целесообразно проводить ректификацию в два этапа. Использование двух колонн, соединённых последовательно и обеспечивающих требуемую суммарную степень обогащения, позволяет уменьшить общие затраты на ректификацию. На рис. 5 представлена зависимость общей удельной нагрузки конденсаторов обеих колонн от концентрации ^3He в верхнем продукте первой колонны, который является сырьём для второй колонны. Как видно из этого рисунка, такая организация процесса ректификации позволит снизить затраты на получение этим методом чистого изотопа ^3He приблизительно на 30 %. При этом степень обогащения в каждой колонне может достигать значения от 30 до 35. Дальнейшее увеличение количества этапов ректификации нецелесообразно. Например, из рис. 5 видно, что при трех этапах с равной степенью обогащения в каждом затраты снизятся только на 1 %.



4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный способ предварительного обогащения природного гелия изотопом ^3He методом фильтрования переохлаждённого жидкого гелия с использовани-

ем керамического фильтра вполне работоспособен.

При выборе параметров ректификации смесей изотопов гелия следует исходить, прежде всего, из условия обеспечения минимума удельных энергетических затрат на криостатирование на самом низком температурном уровне. В этом состоит основное отличие представленного метода от традиционного, характерного, например, для техники разделения воздуха, где при выборе параметров ректификационной установки принимают во внимание не только затраты на ее эксплуатацию, но и на её изготовление и сооружение. Оптимальное значение концентрации ^3He в продукте фильтрования 0,1 % об. В этом случае целесообразно проводить ректификацию в два этапа. Производство ^3He из природного гелия не только возможно, но и может быть весьма рентабельным при современных ценах на энергоносители и на этот продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В. Л., Графов А. П. Технология получения гелия-3 из природного гелия // Тезисы докладов 8-ой межд. научно-практич. конф. «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития». Москва. — 2011. — С. 66-67.
2. Пешков В. П., Зиновьева К. Н. Экспериментальные работы с ^3He // Успехи физических наук. — 1959. — Т. LXII. — Вып. 2. — С. 193-244.
3. Кузнецов В. М. Разделение изотопов гелия ректификацией и термоосмосом // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32. — Вып. 5. — С. 1001-1011.
4. Есельсон Б. Н., Григорьев В. Н., Иванцов В. Г. Растворы квантовых жидкостей ^3He - ^4He . — М: Наука, 1973. — 423 с.
5. Shaposhnikov V. A., Grafov A. P., Zotov N. V. An investigation of HeII flow crisis in porous media // Third Soviet-West Germany Symposium on Heat Exchange // Физика низких температур. — 1990. — Т. 16. — № 4. — С. 468-470.
6. Низкотемпературный метод повышения концентрации лёгкого изотопа ^3He в смеси ^3He - ^4He природной концентрации. / А. М. Архаров, В. В. Барышников, А. А. Жердев и др. // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. — 1993. — № 3. — С. 4-11.
7. Кузьменко И. Ф. Технологическое оборудование для производств извлечения гелия из природного газа // Технические газы. — 2011. — № 4. — С. 37-44.
8. Wilkes W. R. A continuous-distillation apparatus for the separation of ^3He from ^4He // Advances in Cryogenic Engineering. — 1971. — V. 16. — P. 298-301.
9. Кузьменко И. Ф., Лебедев Л. Б. Разделение смеси He^3 - He^4 методом низкотемпературной ректификации // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1995. — № 2. — С. 38-39.