

В. Л. Бондаренко, А. П. Графов

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПА ^3He ИЗ ПРИРОДНОГО ГЕЛИЯ КРИОГЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Незаменимость ^3He почти во всех областях его применения и отсутствие традиционного сырья для его производства сегодня являются причиной появления дорогостоящих проектов его добычи из реголита Луны. Компромиссным решением проблемы нехватки ^3He может быть его получение криогенными методами из товарного гелия, являющегося природной смесью изотопов гелия-4 и ^3He . Представлены результаты приближенного анализа затрат на термостатирование в криогенной технологии получения ^3He из природного гелия.

E-mail: grafov@iceblick.com

Ключевые слова: ^3He , концентрация, сверхтекучесть, термомеханический эффект, примеси, фильтрация, термостатирование, затраты.

Легкий изотоп гелия ^3He сегодня является основным и незаменимым компонентом детекторов ионизирующего излучения. Около 80 % таких детекторов используется для мониторинга несанкционированного перемещения радиоактивных материалов, который является важнейшим фактором обеспечения радиационной безопасности на нашей планете.

До последнего времени этот изотоп получали как продукт распада трития, образующегося при производстве ядерного оружия. В связи с сокращением ядерных арсеналов сократилось производство трития и, соответственно, сократилось производство изотопа ^3He . Сегодня объем производства ^3He составляет около $10 \text{ нм}^3/\text{г}$, а мировые потребности — около $60 \text{ нм}^3/\text{г}$. Этот дефицит составляет проблему не только в связи с обеспечением мониторинга радиационной обстановки на планете, но и в связи с перспективой использования данного изотопа в качестве топлива в термоядерных энергетических установках.

Именно с дефицитом ^3He связано появление известных дорогостоящих государственных программ добычи на Луне сырья, содержащего этот изотоп.

В то же время еще не исчерпаны возможности получения достаточного количества ^3He из сырья, имеющегося на Земле. Таким сырьем может быть товарный гелий, являющийся природной смесью изотопов ^4He и ^3He . Концентрация ^3He в товарном гелии, добываемом из природного газа, составляет в среднем $\sim 0,2 \text{ ppm}$, а в гелии, получаемом из продуктов разделения воздуха, — $1,4 \text{ ppm}$. Количество ^3He , содержащееся во всем производимом за год гелии составляет около 30 нм^3 .

Предпосылками криогенной технологии получения ^3He из смеси изотопов являются результаты фундаментальных теоретических и экспериментальных работ, выполненных в середине прошлого века в целях изучения и использования свойств жидких растворов этих изотопов [1–3]. Успешно опробованные тогда технологические приемы разделения растворов ^4He – ^3He используются и по сей день в лабораторных целях.

В соответствии с этими предпосылками извлечение ^3He из природного гелия представляется состоящим из двух этапов:

- предварительное обогащение исходной бедной природной смеси в целях получения концентрата, содержащего 0,1... 5 % ^3He ;
- получение чистого ^3He из этого концентрата традиционными методами низкотемпературной ректификации или адсорбции.

Главной особенностью этой технологии (рис. 1) является принцип предварительного обогащения природного гелия легким изотопом. Этот принцип состоит в ожигении гелия, охлаждении его до температуры ниже 2,17 К и последующей фильтрации примесей полученного жидкого гелия. При такой температуре основная часть жидкого гелия, состоящая из изотопа ^4He , приобретает свойство сверхтекучести — способности без сопротивления перетекать через очень узкие каналы. Поскольку размер каналов используемого здесь фильтра составляет ~ 1 мкм, то через них перетекает в основном только сверхтекучий изотоп ^4He , а изотоп ^3He и другие примеси задерживаются фильтром. Так происходит накопление изотопа ^3He на входе в фильтр.

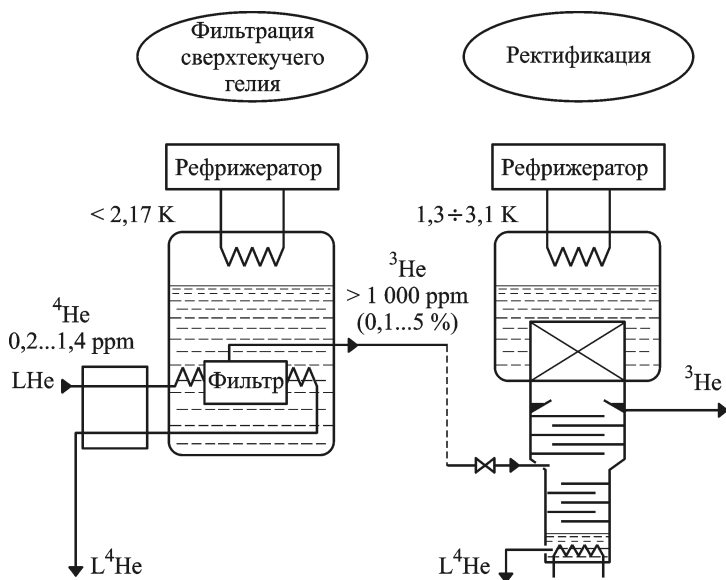


Рис. 1. Принципиальная схема технологии получения ^3He из природного гелия

Накопленный перед фильтром концентрат отводится в хранилище или подается в установку получения чистого ${}^3\text{He}$.

Отличительной особенностью ректификации концентрата изотопов гелия в целях получения из него чистого ${}^3\text{He}$ является:

- необходимость термостатирования конденсатора колонны при температуре ниже 2,1 К;
- весьма малые размеры колонны: длина менее 700 мм и диаметр менее 25 мм;
- производительность (до 5 нл/ч чистого ${}^3\text{He}$ в лабораторных образцах прошлого века), позволяющая с помощью одной или нескольких установок получать весь ${}^3\text{He}$, который может содержаться в товарном гелии, произведенном во всем мире за год.

Известен прошлый и современный опыт получения чистого ${}^3\text{He}$ из небольших количеств разбавленных растворов ${}^4\text{He}$ – ${}^3\text{He}$ в лабораторных условиях, для которых затраты на получение ${}^3\text{He}$ не имеют практического значения. И напротив, эти затраты являются главным критерием оценки возможности получения ${}^3\text{He}$ 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 менее 2 К. Очевидно также, что эти затраты зависят как от значений тепловыделений в фильтре и в конденсаторе колонны, так и от выбора средств термостатирования.

Тепловыделения в фильтре. Во всех известных сегодня публикациях, касающихся, так или иначе, выделения ${}^3\text{He}$ из его раствора с ${}^4\text{He}$ методом низкотемпературной фильтрации, обсуждается только один принцип работы такого фильтра [1–4]. Этот принцип, основан на использовании известного термомеханического эффекта (ТМЭ), характерного для сверхтекучего ${}^4\text{He}$.

В этом случае для возбуждения потока сверхтекучего ${}^4\text{He}$ через фильтр используют подогрев гелия в выходной камере фильтра (рис. 2, а), т.е. причиной движения сверхтекучего ${}^4\text{He}$ в каналах фильтра является нагрев и повышение температуры T_k в выходной камере фильтра, а повышение давления p_k в камере фильтра является следствием этого возникающего движения гелия. Нагретый в выходной камере фильтра жидкий гелий поступает в выходной теплообменник, в котором охлаждается до температуры окружающей (фильтр) среды. В данном случае нагрузка на рефрижератор $Q_{\text{рефр}}$, с помощью которого осуществляется термостатирование фильтра, равна сумме теплоты $Q_{\text{ф}}$, выделяющейся во входной камере фильтра, и теплоты, выделяемой выходным теплообменником $Q_{\text{вых}}$.

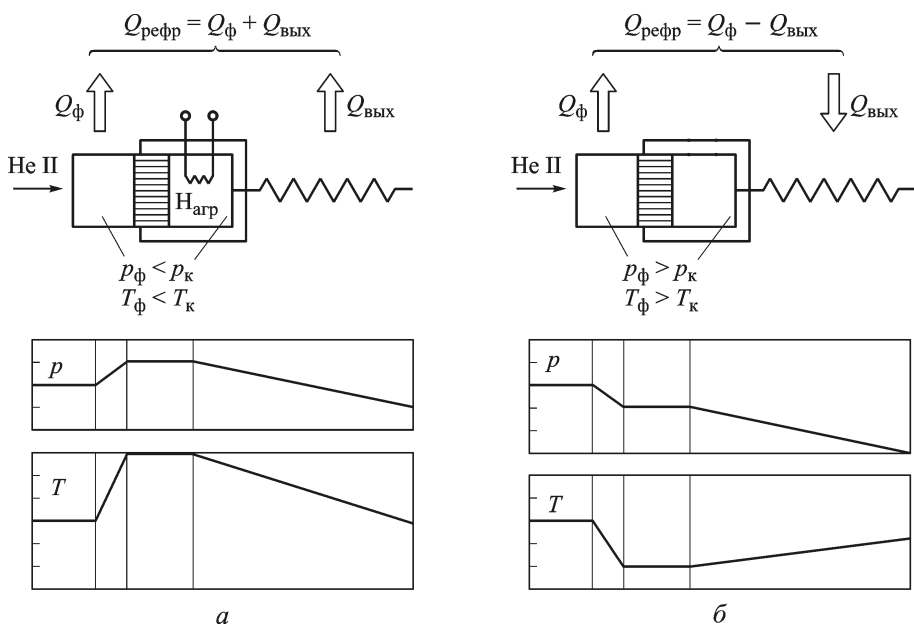


Рис. 2. Два способа фильтрации:

a – с использованием ТМЭ; *б* – с использованием МКЭ

Предлагается использовать более экономичный способ фильтрации, основанный на известном механокалорическом эффекте (МКЭ), характерном для сверхтекучего ^4He (рис. 2, б). В этом случае для того чтобы вызвать движение сверхтекучего гелия в каналах фильтра, создают перепад давления на фильтре, повышая давление жидкости p_ϕ на входе в него, как и при фильтрации обычных жидкостей. Следствием этого является понижение температуры гелия в камере фильтра T_k относительно температуры гелия во входной камере T_ϕ и температуры среды, окружающей фильтр. В выходном теплообменнике этот гелий нагревается до температуры окружающей среды, поглощая из нее теплоту $Q_{\text{вых}}$. При этом нагрузка на рефрижератор $Q_{\text{рефр}}$ значительно меньше, чем в случае использования ТМЭ, так как равна не сумме, а разности Q_ϕ и $Q_{\text{вых}}$.

Степень этого понижения температуры T_k в выходной камере фильтра зависит от множества обстоятельств и может быть весьма незначительной. Поэтому для приблизительной (с запасом) оценки затрат на термостатирование фильтра в данном случае можно принять, что нагрузкой на рефрижератор являются только тепловыделения во входной камере фильтра, т.е. $Q_{\text{рефр}} \approx Q_\phi$. При допущении, что через каналы фильтроэлемента переносится только сверхтекучая часть ^4He [5, 6],

$$Q_\phi = MS_\phi T_\phi, \quad (1)$$

где M , S_ϕ , T_ϕ – масса, удельная энтропия и температура гелия, поданного в фильтр.

Оценка удельных тепловыделений в фильтре была выполнена в ходе испытаний модельных фильтров с керамическими фильтроэлементами. Цель этих экспериментов — проверка работоспособности фильтров, способов отбора концентрата из фильтра и различных способов организации фильтрации.

При этом использовался наиболее простой способ термостатирования на уровне ниже 2 К — откачкой паров жидкого гелия вакуумным насосом.

В части экспериментов в качестве сырья для получения концентрата ${}^3\text{He}$ использовался газообразный природный гелий с концентрацией ${}^3\text{He}$ около 1,4 ppm. Средняя температура жидкого гелия, в который был погружен фильтр, $\sim 1,9$ К. Для откачки паров этого гелия использовался золотниковый вакуумный агрегат с быстротой откачки 20 л/с. В этом случае средний расход исходного газообразного гелия (сырья), зависящий от производительности насоса, составлял $\sim 0,7$ нм³/ч. Количество ${}^3\text{He}$ в полученном концентрате $W_3 \approx 17$ нсм³, а концентрация — 0,14 %. Коэффициент извлечения ${}^3\text{He}$ равнялся $\sim 0,91$. Количество испарившегося во время эксперимента жидкого гелия, в который был погружен фильтр, составило 6 кг. Величина удельных тепловыделений в фильтре $q_{\text{ф}} = Q_{\text{ф}}/W_3$, определенная, исходя из количества испарившегося гелия и количества ${}^3\text{He}$ в полученном концентрате, составила около 7,8 МДж/нл(${}^3\text{He}$) или 2,2 кВт·ч/нл(${}^3\text{He}$).

Следует отметить, что действительное значение тепловыделений в фильтре заметно меньше, так как часть указанного количества испарившегося гелия, очевидно, связана с компенсацией недорекуперации в несовершенном входном теплообменнике фильтра.

Расчетное значение удельных тепловыделений во входной камере фильтра $q_{\text{ф}}$ в этом случае меньше измеренного и составляет $\sim 0,2$ МДж/нл(${}^3\text{He}$) или $5,5 \cdot 10^{-2}$ кВт·ч/нл(${}^3\text{He}$).

Тепловыделения в конденсаторе ректификационной колонны. Удельные тепловыделения в конденсаторе ректификационной колонны можно оценить, используя опубликованные ранее сведения о результатах экспериментов с подобными колоннами. В частности, Wilkes [7], описывая эксперименты с такой колонной, сообщает, что флегмовое число составляло 32 при расходе полученного чистого ${}^3\text{He}$ 5,2 нл/ч, температуре конденсатора 1,93 К, и концентрации ${}^3\text{He}$ в исходной смеси 8,7%. Из этих данных следует, что значение удельных тепловыделений в конденсаторе при этом составляло 110 Дж/нл или $3,1 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч/нл.

Оптимальные режимы работы фильтра и колонны. В случае реализации данной технологии получения ${}^3\text{He}$ неизбежна проблема

выбора концентрации ${}^3\text{He}$ в продукте фильтрации, являющемся исходным сырьем для последующего процесса ректификации. Обычно при решении этой проблемы исходят из условий обеспечения максимальной эффективности второго этапа этой технологии — ректификации. Именно поэтому до последнего времени при разработке и исследованиях ректификации смесей ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ принимают значения концентрации ${}^3\text{He}$ в потоке питания колонны 5...10%, соответствующие экстремальному предварительному обогащению ${}^3\text{He}$ исходного сырья [1–7]. Однако, как кажется, при выборе значения этого параметра в промышленной технологии целесообразно исходить из условия обеспечения минимума суммы удельных затрат на термостатирование в этих двух смежных процессах: фильтрации и ректификации. Точное численное решение этой оптимизационной задачи выходит за рамки данной статьи, но для обоснования такого подхода к выбору режимов работы фильтра и ректификационной колонны, кажется достаточно и приближенной оценки суммы удельных тепловыделений в фильтре и ректификационной колонне.

О зависимости значения удельных тепловыделений в фильтре q_f от концентрации ${}^3\text{He}$ в продукте фильтрации косвенно свидетельствуют экспериментальные данные о скорости фильтрации при использовании ТМЭ, представленные в работе [2]. Из этих данных, а также из анализа влияния примесей ${}^3\text{He}$ на свойства сверхтекучего ${}^4\text{He}$ [8] следует, что по мере увеличения концентрации ${}^3\text{He}$ в продукте фильтрации увеличивается и значение удельных тепловыделений во входной камере фильтра q_f . В области значений этой концентрации, подходящих для последующей переработки этого продукта методом ректификации, это увеличение особенно заметно.

Элементарный анализ процессов в такой колонне показывает, что значение удельных тепловыделений в конденсаторе обратно пропорциональны концентрации ${}^3\text{He}$ в исходной смеси при прочих одинаковых условиях.

Иными словами, чем больше концентрация ${}^3\text{He}$ в продукте предварительного обогащения, тем больше удельные тепловыделения в фильтре и тем меньше удельные тепловыделения в конденсаторе ректификационной колонны.

На рис. 3 приведены зависимости удельных тепловыделений в фильтре и в колонне, а также суммы этих тепловыделений от концентрации ${}^3\text{He}$ в продукте фильтрации.

Как следует из рис. 3, минимум суммы тепловыделений в фильтре и в ректификационной колонне составляет от $2 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^4$ Дж/нл и соответствует диапазону значений концентрации ${}^3\text{He}$ в продукте фильтрации от 0,02 до 0,2%.

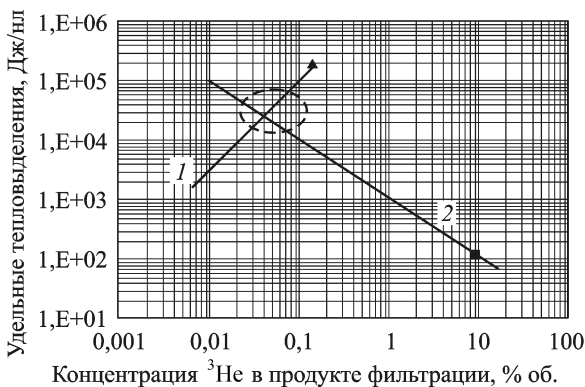


Рис. 3. Зависимости тепловыделений в фильтре (1) и в конденсаторе ректификационной колонны (2) от концентрации ^3He в продукте фильтрации:

▲ — из экспериментов с модельными фильтрами; ■ — по результатам экспериментов с ректификационной колонной [7]; - - - — область оптимальных значений

Если для термостатирования фильтра и конденсатора ректификационной колонны используется рефрижератор с удельными энергетическими затратами (например, 1500 Вт/Вт), то минимальное значение общих удельных энергетических затрат на получение ^3He из природного гелия может составить, как следует из приведенного анализа, от 8 до 30 кВт·ч/нл.

Следует отметить, что полученное таким образом значение удельных энергетических затрат намного меньше значений, приведенных в известных публикациях, касающихся возможностей применения криогенных технологий получения ^3He из природного гелия [9].

Итак, из изложенного следует, что производство ^3He из природного гелия не только возможно, но и весьма рентабельно при современных ценах на энергоносители и на этот продукт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешков В. П., Зиновьева К. Н. Экспериментальные работы с ^3He // Успехи физических наук. – 1959. – Т. LXII, вып. 2. – С. 193–244.
2. Кузнецов В. М. Разделение изотопов гелия ректификацией и термоосмосом // ЖЭТФ. – 1957. – Т. 32, вып. 5. – С. 1001–1011.
3. Растворы квантовых жидкостей $\text{He}^3\text{--He}^4$ / Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Г. Иванцов и др. – М.: Наука, 1973.
4. Низкотемпературный метод повышения концентрации легкого изотопа ^3He в смеси $^3\text{He}\text{--}^4\text{He}$ природной концентрации / А.М. Архаров, В.В. Барышников, А.А. Жердев и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 1993. – № 3. – С. 4–11.
5. Паттерман С. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. – М.: Мир, 1978. – 520 с.
6. Арр V. Heat transport through helium II // Cryogenics. – 1970. – Vol. 10, – no. 4. – P. 96–105.

7. W i l k e s W. R. A continuous-distillation apparatus for the separation of ^3He from ^4He // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1971. – Vol. 16. – P. 298–301.
8. П о м е р а н ч у к И. Я. О движении посторонних частиц в гелии II. Собрание научных трудов I // *Физика низких температур. Нейтронная физика. ДАН СССР*, 1948, 59, 669. – 192 с.
9. К у з ь м е н к о И. Ф. Технологическое оборудование для производств извлечения гелия из природного газа // *Технические газы*. – 2011. – № 4. – С. 37–44.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012