

УДК 621.593

И.Ф. Кузьменко

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

e-mail: ivan_kuzmenko@cryogenmash.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В связи с предстоящим освоением крупных месторождений гелийсодержащего природного газа в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке приобретает актуальность и практическую важность комплекс проблем выделения гелия из природного газа, очистки гелиевого концентрата от примесей, ожижения, хранения и транспортирования гелия. Изложены сведения о современном состоянии производства гелия в мире и рассмотрены технические проблемы по очистке и комплексной переработке природного газа, которые предстоит решить отечественной газовой промышленности. С этих позиций сделана попытка обобщения опыта компании «Криогенмаш» по разделению газовых смесей, получению продуктов высокой чистоты, ожижению, хранению и транспортированию технических газов применительно к гелиевым производствам.

Ключевые слова: Криогенная техника. Состав газа. Концентрация. Гелий. Выделение гелия. Коэффициент извлечения. Холодопроизводительность. ^4He . ^3He . Адсорбция. Сепарация. Ректификация. Примеси. Очистка от примесей.

I.F. Kuzmenko

PROCESS EQUIPMENT FOR PROVISION OF HELIUM RECOVERY FROM NATURAL GAS

The complex of the problems concerning recovery of helium from natural gas, removal of impurities from helium concentrate, liquefaction, storage and transportation of liquid helium becomes of high priority and of practical importance in connection with the forthcoming development of large deposits of helium-containing natural gas in the Eastern Siberia and in the Far East. The information about the current state of helium production in the world is presented and the technical problems of natural gas purification and complex reprocessing are considered, which should be solved by the domestic gas industry. From this point of view the attempt is made of generalization the experience of «Cryogenmash» in gas mixtures separation, production of high-purity products, liquefaction, storage and transportation of industrial gases as applied to the helium production facilities.

Keywords: Cryogenic engineering. Gas composition. Concentration. Helium. Isolation of helium. Recovery factor. Refrigerating capacity. ^4He . ^3He . Adsorption. Separation. Rectification. Impurity. Purification of impurities.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прошло уже 115 лет с момента открытия гелия на Земле. До сего дня этот уникальный газ не перестает играть ведущую роль в развитии фундаментальной науки и передовых технологий. В своё время научный мир восхищённо следил за достижением всё более низких температур и эпопеей ожижения самого гелия. Затем последовали величайшие открытия сверхпроводимости и сверхтекучести, а также многие другие достижения в физике, электронике, оптике, медицине, лазерной технике и других направлениях, как уже вошедшие в повседневную жизнь, так и стоящие на пороге научно-технического прогресса [1,2].

Основным источником получения гелия является

природный газ некоторых месторождений. Подобные месторождения и запасы гелия сосредоточены в США, Катаре, России и Алжире и в существенно меньших масштабах — в Канаде, Австралии, Польше и некоторых других странах [2]. Исторически сложилось так, что первая установка по извлечению гелия из природного газа (ПГ) была построена в США ещё в 1917 г. Но только с начала 60-ых гг. производство гелия стало приобретать крупномасштабный характер [3]. За прошедшие примерно 40 лет в США было построено более 20 установок для извлечения гелиевого концентрата и получения чистого гелия. Позднее несколько установок были введены в эксплуатацию в России, Алжире, Польше, а в последние годы — в Канаде, Катаре, Австралии.

Часть установок извлечения гелия, выработав запасы месторождений, уже выведены из эксплуатации. По данным [4] к 2005 г. в работе оставались по всему миру всего 14 установок, которые производили примерно 165 млн. м³ гелия, в том числе 75 % этого объёма приходится на долю США. Для сравнения скажем, что с пуском Оренбургского гелиевого завода в России был достигнут уровень производства гелия 9 млн. м³ в год [5].

В 70-90-ых годах вслед за успехами технологий применения гелия потребности в нём устойчиво росли с темпом почти 8 % в год. Постепенно стали ощущаться диспропорции между потребностями и производственными возможностями получения гелия. Анализ маркетинговой ситуации, выполненный фирмой «Air Products» [6], показывал, что после 2003 г. спрос на гелий будет превышать возможности мирового производства. Характерно, что в технической литературе появились публикации [4], посвящённые разработкам по экономному расходованию, сбору, переработке и повторному использованию гелия в научных исследованиях и промышленности. Тем не менее, после использования большая часть гелия выбрасывается в атмосферу и теряется безвозвратно.

Однако именно в это время появляются новые возможности для расширения извлечения гелия из природного газа. Было обращено внимание, что возможности промышленности СПГ Алжира позволяют извлекать до 100 млн. м³ гелия в год, тогда как реально извлекается только 17 млн. м³ [7]. В Катаре фирмой «Air Liquide» построен крупный гелиевый завод, позволяющий удовлетворить примерно 10 % мирового спроса на гелий [7,8]. Характерно, что по условиям соглашения с «RasGas» и «QatarGas» примерно половина производительности завода на 20 лет передаётся для реализации фирме «Air Liquide», 30 % — «Linde», что укрепляет их позиции как крупных поставщиков гелия.

Реализация проектов в Катаре и Алжире на короткий промежуток времени сбалансировала потребности и производство гелия [4], но по-прежнему спрос растёт более быстрыми темпами, чем мощности по производству гелия. В этой связи в мире с интересом наблюдают за ситуацией в этой сфере в России. ОАО «Газпром» начинает освоение ряда газоконденсатных месторождений в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, весьма богатых гелием. Запасы гелия здесь оцениваются величиной порядка 10 млрд. м³, что составляет примерно четверть от разведанных мировых запасов. Очевидно, что большая четвёрка мировых криогенных фирм («Air Products», «Praxair», «Linde», «Air Liquide»), которые имеют значительный опыт создания производств гелия и сейчас контролируют более 90 % мирового рынка гелия, приложат усилия, чтобы занять своё место в освоении столь мощного ресурса.

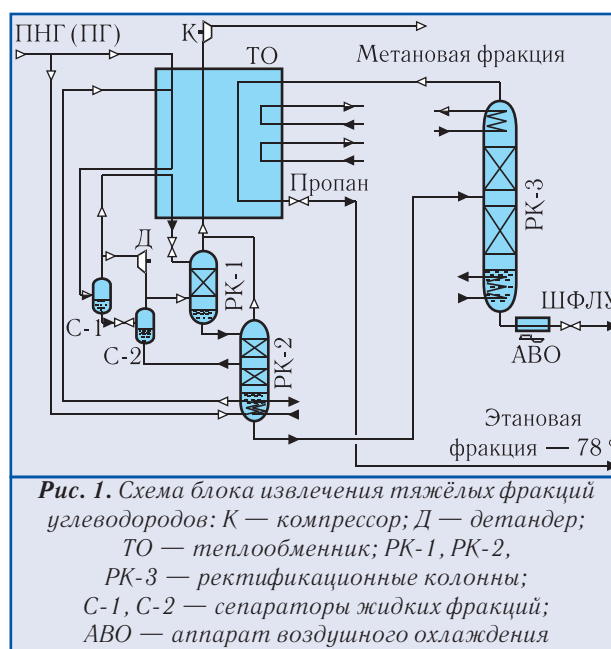
Освоение новых месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке в первую очередь диктуется необходимостью увеличения добычи природного газа. Однако придание гелию на законодательном уровне статуса стратегического ресурса выводит его в разряд такого же целевого продукта, как и природный газ. Объективно это обстоятельство в большой степени

усложняет и удорожает процесс освоения новых месторождений. Придавая этому государственный масштаб, ОАО «Газпром» на Научно-техническом совете в сентябре 2010 г. рассмотрел комплекс вопросов по развитию гелиевых производств и установил, что отечественная наука, предприятия машиностроения, газовой и криогенной промышленности в целом имеют достаточный потенциал и опыт решения предстоящих технических проблем.

В настоящей работе сделана попытка обобщения опыта ОАО «Криогенмаш» по разделению газовых смесей, получению продуктов высокой чистоты, ожижению, хранению и транспортированию технических газов применительно к гелиевым производствам.

2. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Гелиеносный природный газ, как правило, помимо метана содержит большое количество примесей. Некоторые из них, как, например, углеводороды метанового ряда и азот, часто характеризуются значительными концентрациями и представляют целевой интерес для извлечения или повышения качества метановой фракции. Другие содержатся в малых объёмах (Н₂, О₂, СО₂, Ra, Н₂S, Hg, Н₂O) и классифицируются как вредные по тем или иным причинам. Поэтому они должны удаляться на начальных стадиях переработки газа [9].



На рис. 1 представлена схема установки очистки природного или попутного нефтяного газа (ПНГ) от тяжёлых фракций углеводородов методом низкотемпературной сепарации и ректификации. Холодопроизводительность процесса обеспечивается турбодетандером на потоке перерабатываемого газа, пропановой холодильной машиной и дроссель-эффектом сжатого газа. Установка позволяет извлечь этановую фракцию и широкую фракцию лёгких углеводородов (ШФЛУ) с высоким коэффициентом извлечения.

Особенность извлечения гелия из метановой фракции, помимо его ценности и исчерпаемости запасов, заключается в том, что его концентрация в процессе переработки газа должна быть увеличена в сотни и тысячи раз: от долей процента в исходном газе до кондиций стандартов на чистый He, превышающих 99,995 %. Во многих установках извлечения гелия, особенно ранних, в основу процесса разделения был положен метод криогенной дистилляции, в результате которой при наличии азота в смеси можно было достичь лишь эквимолярной концентрации смеси (N_2 -He), составляющей чаще всего 65-80 % He. Эта смесь получила название «сырого» гелия или гелиевого концентрата как полупродукта, весьма подходящего для длительного хранения гелия. При необходимости получения чистого продукта гелиевый концентрат подвергается дальнейшей очистке методами криогенной сепарации или ректификации с последующей доочисткой методом адсорбции при низких температурах.

В случае компактного расположения источников гелиеносного газа отдельные производства гелиевого концентрата, подземная ёмкость для его длительного хранения, установки получения товарного гелия объединяются общим коллектором гелиевого концентрата, который находится в динамическом режиме процессов закачки и расходования. Примером такой разветвлённой системы может служить подземное хранилище гелиевого концентрата с трубопроводным коллектором Техас-Канзас длиной около 700 км, к которому подключены 11 установок извлечения концентрата и около 10 установок чистого гелия [10,11].

Вероятно, подобная схема и технология будут приняты в процессе развития гелиевых производств и в Восточной Сибири, и на Дальнем Востоке. Оставляя за пределами рассмотрения традиционно решаемые на газоперерабатывающих заводах вопросы очистки газа от вредных примесей и выделения при необходимости углеводородов C_2+ , сосредоточим внимание на процессах извлечения гелия. С позиций утилизации гелия в процессе добычи и реализации метановой фракции газа представляют интерес два целевых режима:

- выделение гелиевого концентрата с целью его сохранения в подземных хранилищах;
- выделение гелиевого концентрата и его очистка до кондиций стандарта на товарный гелий для отгрузки в виде сжатого газа высокого давления или последующего ожижения.

В обоих случаях газ после предварительной обработки и очистки помимо метана включает примеси азота, а также неконденсируемых газов, и в незначительном количестве углеводородов. Первый вариант наиболее просто реализуется вследствие того, что целевой компонент — гелий, имея высокую летучесть в смеси с метаном, легко выделяется. К содержанию же азота и других легкокипящих в гелиевом концентрате не предъявляется никаких требований. В этом случае метановая фракция после охлаждения в пластинчато-ребристом теплообменнике поступает на разделение в классическую колонну двукратной ректификации. Колонна высокого давления (нижняя) служит для предварительного

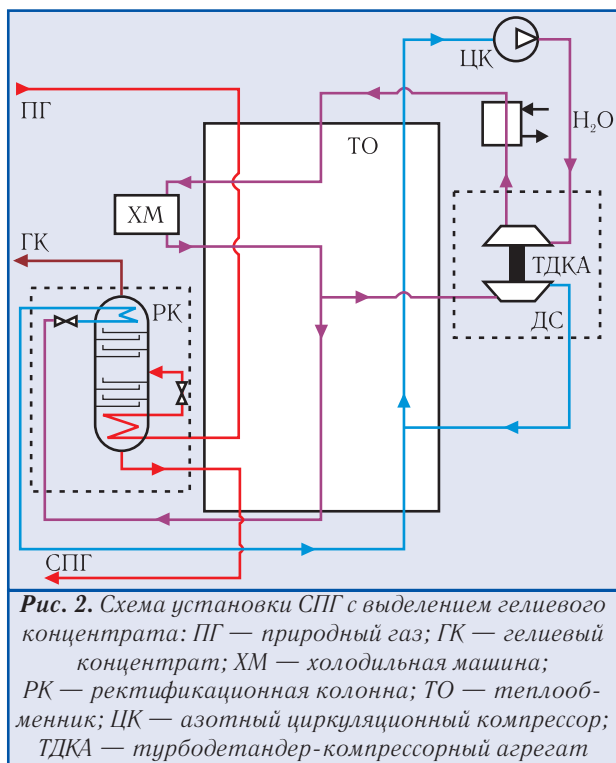
разделения метановой фракции. Кубовая жидкость из неё охлаждается в переохладителе и дросселируется в верхнюю колонну среднего давления в качестве питания. Верхний продукт нижней колонны после переохлаждения дросселируется вверх колонны среднего давления, обеспечивая её флегмовое питание. Конденсатор-испаритель, установленный между колоннами, обеспечивает паровое питание верхней колонны и флегмовое питание нижней. Из верхней части верхней колонны отводится гелиевый концентрат, представляющий собой смесь гелия с азотом и примесями водорода, неона, кислорода, который направляется в коллектор гелиевого концентрата. Жидкий метан из куба верхней колонны дожимается насосом до необходимого давления и после рекуперации холода в основном теплообменнике направляется в газопровод для реализации.

Выделение гелиевого концентрата в случае, если метановую фракцию необходимо получать в виде СПГ, существенно отличается от описанного вследствие необходимости компенсации больших потерь холода с выводом СПГ. Для установок ожижения природного газа в ОАО «Криогенмаш» разработана технология с внешним азотным холодильным циклом с одной или несколькими детандерными ступенями [12]. На рис. 2 приведена схема установки выделения гелиевого концентрата и получения СПГ с азотным холодильным циклом с детандером и предварительным фреоновым охлаждением. Установка предназначена для получения СПГ в количестве 4,3 т/ч с выделением примерно 19 $nm^3/ч$ гелиевого концентрата с коэффициентом извлечения 99,6 %. Удельный расход энергии, отнесённый к СПГ, составляет 0,69 кВт·ч/кг СПГ, в том числе 11 % энергозатрат приходится на извлечение гелиевого концентрата. Для установок большей производительности по СПГ разработаны более эффективные схемы с двумя и более ступенями детандеров.

При необходимости получения товарного гелия гелиевый концентрат подвергается очистке от примесей в соответствии с требованиями стандарта на гелий марки А. Гелиевый концентрат, извлекаемый из природного газа, как правило, содержит примеси азота, кислорода, водорода, неона и метана. Разная физическая природа примесей является причиной того, что для их удаления ранее применялись разнообразные ступенчатые способы. В частности, для удаления горючих составляющих (H_2 , CH_4) может быть применено каталитическое окисление с подачей в реактор кислорода или воздуха. Затем продукты сгорания удаляются в блоке адсорбционной очистки и осушки, а остаточные примеси азота — адсорбционным методом при температуре жидкого азота.

ОАО «Криогенмаш» традиционно владеет указанными методами и имеет большой опыт их применения в установках очистки редких газов. Однако следует признать, что подобная технология достаточно громоздка и малоприспособна для масштабного производства гелия. Поэтому в последние годы в связи с успешным развитием метода короткоциклового адсорбции (PSA) для крупномасштабного производства чистого водорода в ОАО «Криогенмаш», как и на других

фирмах [13], перспективы очистки гелиевого концентрата для крупных производств связывают с технологией PSA. Гелий, отводимый из установки PSA, соответствует требованиям стандарта, а продувочный газ во избежание потерь продукта направляется в технологический цикл на рециркуляцию.



3. ОЖИЖЕНИЕ, ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ГЕЛИЯ

3.1. Ожижители гелия

Собственно ожижитель гелия (ОГ) включает: систему подготовки газообразного гелия, маслозаполненный винтовой компрессор, систему очистки гелия от масла и осушки, систему тонкой очистки гелия от примесей воздуха, холодный блок с детандерами, систему очистки от неона, резервуар жидкого гелия. На предприятии разработана и внедрена в промышленность серия ожижителей гелия производительностью от 200 до 2400 л/ч, технические характеристики которых приведены в таблице. Ожижители работают по циклу среднего давления с предварительным азотным охлаждением и тремя детандерными ступенями. Выбранная схема представляется классической и оптимально соответствующей требованиям непрерывной работы в течение 8500 ч/год. Основные особенности ожижителей ОАО «Криогенмаш» заключаются в применяемых оригинальных схемно-конструктивных решениях.

Для ожижителей гелия с несколькими ступенями ох-

лаждения, работающих в промышленных условиях, важным вопросом является взаимосвязанное регулирование турбодетандеров и компрессора. При использовании компрессоров объёмного действия, например, винтовых маслозаполненных, привлекательной выглядит идея регулирования их массовой производительности за счёт изменения давления гелия на всасывании. Подобные компрессоры с широким интервалом производительностей выпускает японская фирма «Мусом».

Сведения о компрессорах фирмы с регулированием производительности на всасывании приводились нами ранее [14]. При этом отмечалось, что специалистами ОАО «Криогенмаш» при поддержке фирмы дополнительно к системе управления компрессора была разработана система внешнего регулирования давления гелия в линиях всасывания и нагнетания. В ходе длительных эксплуатационных испытаний установки ОГ-300 в Индии была подтверждена надёжная работа системы регулирования при постоянных степенях повышения давления в компрессоре и расширения в турбодетандерах. Массовый расход в цикле изменяется в широких пределах в соответствии с необходимой холодопроизводительностью при неизменных объёмных расходах, КПД компрессора и турбодетандеров и следовательно удельного расхода энергии на ожижение.

Вторая важная особенность ожижителей нашей компании связана с применением в холодных блоках встроенной запорной и регулирующей криогенной арматуры, управляемой пневматически без необходимости вывода штока в теплую зону. Это существенно снижает потери холода и радикально упрощает конструкцию холодных блоков.

Такая конструкция сформировала типовую компоновку холодных блоков ожижителей и их строгий дизайн. Фото 3 даёт представление о внешнем виде холодного блока ожижителя ОГ-300, состоящего из трёх холодных корпусов: оборудования азотного уровня, низкотемпературной очистки гелия от примесей и степени ожижения. Вся внешняя обвязка холодных блоков сосредоточена в нижнем кожухе прямоугольной формы и доступна при испытаниях и пуско-наладочных работах через дверные проемы, закрытые в процессе нормальной эксплуатации. Аналогичную конструкцию имеют и другие ожижители. В частности, на фото 4 показано оборудование ожижителей ОГ-800 во время испытаний в Институте атомной энергии им. Курчатова (ИАЭ).

Основные характеристики холодных блоков ожижителей гелия

Параметр	ОГ-200	ОГ-300	ОГ-400	ОГ-800	ОГ-2400
Производительность, л/ч	200	300	400	800	2400
Рабочее давление, МПа	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Расход энергии на ожижение, кВт	180	270	360	720	2160
Расход жидкого азота, кг/ч	80	120	160	315	940
Габариты, мм:					
— ширина	2600	3150	3150	3150	3150
— высота	3700	3700	3700	3700	3700
— длина	4500	7800	6000	6000	6000
Масса, кг	5000	15000	9000	11200	9000



Фото 3. Холодный блок ОГ-300 на платформе перед отправкой заказчику



Фото 4. Оборудование ожижителя ОГ-800 во время испытаний в ИАЭ им. Курчатова

3.2. Хранение и транспортирование жидкого гелия

При создании крупных систем криогенного обеспечения для Института атомной энергии им. Курчатова, Института физики высоких энергий (Протвино) ОАО «Криогенмаш» накопил опыт разработки и производства резервуаров для жидкого гелия. Были созданы три типоразмера резервуаров с объемами 1,25, 16 и 40 м³. На рис. 5 показан внешний вид и внутреннее устройство резервуара для жидкого гелия объемом 40 м³. Основные характеристики резервуара РЦВГ-40: диаметр гелиевого сосуда — 2800 мм; диаметр кожуха — 3400 мм; полная высота — около 11 м; рабочее давление — 0,07 МПа; потери от испарения — 0,45 % в сутки. Сосуд оборудован азотной ванной с охлаждаемым экраном. Данные о характеристиках других резервуаров для жидкого гелия приведены в [15].

Помимо собственно резервуаров для хранения жидкого гелия следует упомянуть о создании уникальных гелиевых криостатов для размещения сверхпроводящих магнитных систем или другого технологического оборудования. Среди них: универсальный испытательный криостат УИК с объемом рабочей камеры 130 м³, имеющий наружный диаметр 5 м и высоту более 9 м; криостат для МГД-генератора МГДЭС-100 с наружным диаметром 6,4 м и длиной 12 м; проект криостата МГДЭС-500 диаметром 8 м и длиной 22.

ОАО «Криогенмаш» выполнил ряд успешных проектов по созданию транспортных цистерн для жидкого водорода [16]. Среди них автомобильная

транспортная цистерна объемом 45 м³ и железнодорожная цистерна объемом 100 м³ для жидкого водорода. Эти цистерны успешно работают в ракетно-космических комплексах Индии и Китая. Нет сомнения, что всё это может служить базой для разработки отечественных транспортных цистерн для жидкого гелия.

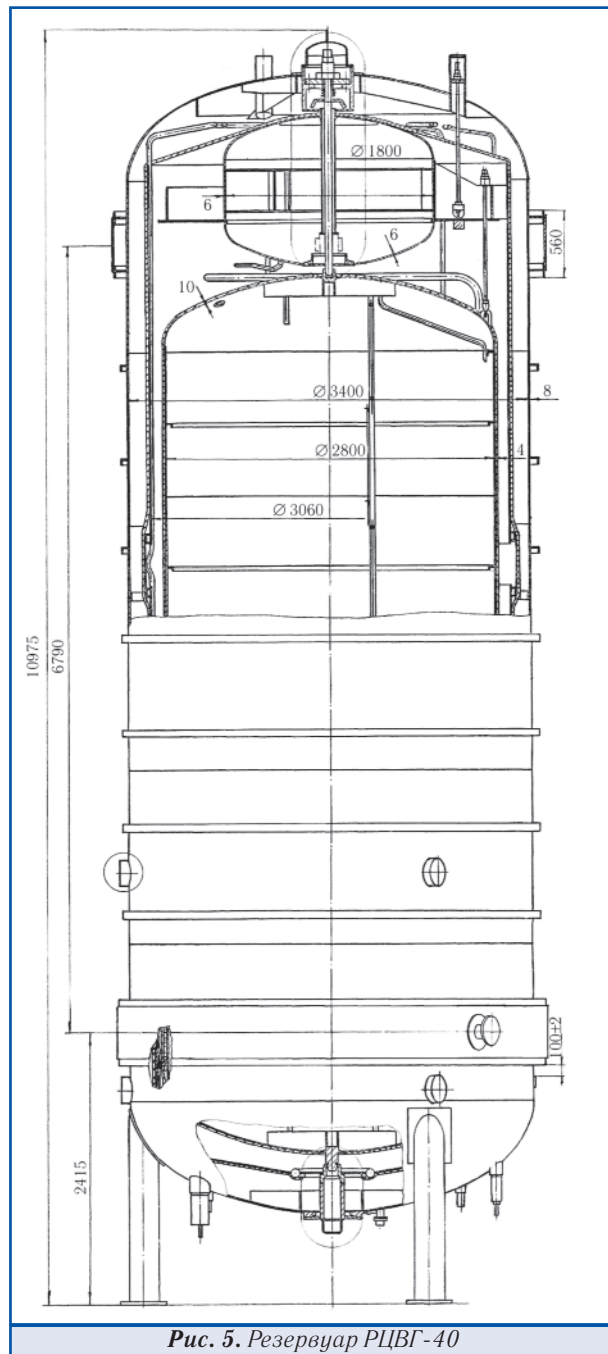


Рис. 5. Резервуар РЦВГ-40

4. ВЫДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПА ГЕЛИЙ-3

Рассматривая проблемы извлечения гелия из природного газа, обычно имеют в виду ⁴He, изотоп гелия, ядро атомов которого содержит 2 протона и 2 нейтрона. Но в природе существует и второй изотоп гелия — ³He с атомной массой 3, в ядре атома которого только один нейтрон. В естественных источниках (атмосфера, природный и попутный нефтяной газ) оба

изотопа существуют совместно в виде смеси, но содержание ^3He в нём по отношению к ^4He ничтожно.

Отличия в строении ядер атомов этих двух изотопов — причина существенных различий физических и термодинамических свойств ^3He , таких как параметры фазовых переходов, диапазоны сверхтекучести, свойства вблизи абсолютного нуля и др., от свойств ^4He . В частности, ^3He имеет самую низкую температуру кипения при нормальном давлении, на порядки более высокое давление насыщенных паров при низких температурах и не обладает свойством сверхтекучести вплоть до ультранизких температур. Всё это исключительно важно для фундаментальной физики и практической современной криогеники.

Однако ^3He помимо этого отличается тем, что концентрирует в себе возможности производства энергии, составляя основу экологически чистой реакции управляемого термоядерного синтеза ($\text{D}+^3\text{He}$), в результате которой получается ^4He , протон и большое количество энергии (до 50 МэВ). Следует упомянуть, что отмеченный вариант реакции наряду с высокой энергией характеризуется более высокой температурой и малой плотностью выделяемой мощности по сравнению с другими вариантами. Тем не менее, для реализации термоядерного проекта ITER на начальном этапе принята реакция ($\text{D}+^3\text{He}$), и мировое сообщество уже приступило к строительству международного реактора в г. Кадараш (Франция) при участии 7 сторон: ЕС, США, Япония, Россия, Индия, Китай и Республика Корея.

Если с получением дейтерия особых проблем нет и его производство методом низкотемпературной ректификации изотопов водорода освоено в развитых странах с 50-ых гг. прошлого века, то получение ^3He ограничено его исключительно малыми ресурсами в практически реализуемых естественных источниках Земли. Конечно, атмосфера Земли содержит значительное количество ^3He , но его содержание в воздухе составляет примерно 7,2 ppt, т.е. 7,2 части на триллион, что означает необходимость повышения парциального давления ^3He при извлечении в 140 млрд. раз. Очевидно, что это нереально, учитывая необходимые масштабы переработки воздуха. Достаточно сказать, что всё кислородное производство в СССР при соответствующем оснащении могло бы произвести в год только 14000 л ^3He .

Несколько иная ситуация может сложиться при освоении газовых месторождений Восточной Сибири. Оценки на базе зарубежного опыта (США, Алжир) показывают, что усреднённая концентрация ^3He в ^4He , извлекаемом из природного газа, составляет 0,1-0,2 ppt. Но отличие от случая извлечения ^3He из атмосферного воздуха состоит в том, что при переработке природного газа с получением гелия в итоге имеем сконцентрированный источник в виде, например, жидкого гелия, из которого необходимо извлечь ^3He . Расчёты показывают, что из гелия, сливаемого только из одного ожижителя производительностью 2400 л/ч, можно извлечь примерно 2800 нл ^3He в год. Очевидно, что такой потенциальный ресурс представляет интерес, если не для термоядерной энергетики, то опреде-

ленно для других научно-технических применений.

Тем более, что ситуация с производством ^3He сейчас резко осложнилась. До настоящего времени практически единственным источником промышленного получения ^3He остаётся переработка термоядерного оружия, при которой тритий, подвергаясь радиоактивному распаду, выделяет ^3He , который и утилизируется. С 1980 г. по 2003 г. США произвели таким методом 260000 л ^3He [17]. Но к настоящему времени производство сократилось до 8000 л/год, тогда как потребности на порядок выше и продолжают расти.

Вероятно, это послужило основанием для американских государственных структур принять ряд документов, призванных регулировать потребление ^3He в текущем десятилетии на уровне не выше 20000 л/год. Официально признано, что изотопу ^3He на Земле грозит исчезновение, вследствие чего принимаются государственные программы, в том числе и Лунная программа [18,19].

Как бы к этому ни относиться, определённо можно утверждать, что освоение газовых месторождений Восточной Сибири, богатых гелием, может произойти достаточно скоро, и ситуация оправдывает постановку технических задач выделения ^3He из сильно разбавленного раствора ^3He - ^4He применительно к крупным криогенным газовым производствам.

Принципиальная доступность разделения смеси ^3He - ^4He подтверждается сравнительно высокой относительной летучестью компонент. При атмосферном давлении она равна 1,3-1,5, возрастая до 2 при 50 кПа и до 3-7 при давлениях 15-7 кПа [20]. Это даёт возможность разделять смесь методом низкотемпературной ректификации. Однако исходная концентрация ^3He в смеси на уровне десятых долей ppt фактически означает, что в начальном сечении процесса движущий напор концентраций близок к нулю, что требует предварительного разделения иным физическим способом. Такой способ базируется на различиях изотопов гелия в проявлении свойства сверхтекучести. При температурах ниже 2,17К ^4He обладает сверхтекучестью, проходя без трения через микронные отверстия. ^3He в этом диапазоне температур сверхтекучестью не обладает и блокируется отверстием, что предопределяет сепарационный эффект.

Листерман [21], исследуя прохождение смеси через отверстия порядка 1 микрона, экспериментально показал, что в сверхтекучем сепараторе достигается обогащение смеси ^3He до концентраций примерно 23 %. Во всяком случае обогащение до 10 % ^3He не вызывает затруднений. *Хэндри и МакКлинтон* [22], решая задачу ультратонкой очистки ^4He от ^3He , разработали модификацию сверхтекучего сепаратора, в котором за счёт наложения теплового градиента в элементе сепаратора возникает поток сверхтекучей компоненты, практически свободный от ^3He . Таким образом, задачи концентрирования ^3He в смеси с ^4He в экспериментальной физике на сегодняшний день решены.

Получение чистого ^3He методом ректификации с учётом предшествующего опыта ОАО «Криогенмаш» не представляет технических трудностей. Исследова-

ния процесса ректификации смеси ^3He - ^4He были выполнены в начале 90-ых гг. [20,23]. В отличие от зарубежных работ [24] ставилась цель исследования не параметров колонны для получения ^3He , а собственно процесса разделения. Поэтому опыты проводились на стенде, позволяющем варьировать основные параметры в широких пределах: скорости пара в диапазоне 0,012-0,038 м/с; давления в колонне от 10 до 100 кПа; температуры в кубе от 2,3 до 4,3 К; температуры в конденсаторе от 2,3 до 3,1 К. В результате были получены обширные данные и профили концентраций и температур по высоте колонны, а также обобщенные зависимости для расчёта высоты единицы переноса, необходимые при проектировании. Разработанный алгоритм и программа расчёта колонн базируются на методе Понсона и, в отличие от [24], учитывают изменение относительной летучести и теплоты парообразования компонент смеси по высоте колонны.

Необходимо добавить, что в указанный период в ОАО «Криогенмаш» был выполнен обширный комплекс НИОКР, направленных на создание криогенного орбитального телескопа «Аэлига» с системой сверхтекучего He-II и минимальной температурой охлаждения зеркала до 0,3 К с применением ^3He . В рамках этого комплекса работ был выполнен ряд исследований теплообмена и гидродинамики при течении сверхтекучего гелия в каналах; процессов в эжекторах, пористых разделителях фаз, фонтан-насосах; теплообмена при кипении и конденсации ^3He , а также опытно-конструкторских работ по созданию рефрижераторов на температурный уровень 1,7 и 0,3 К, бортовой макета криогенного блока телескопа и др. элементов.

Содержание и результаты этих работ позволяют с уверенностью синтезировать принципиальную схему блока выделения ^3He из товарного жидкого гелия, извлекаемого из ПГ. На рис. 6 представлена структурно-функциональная схема извлечения ^3He из жидкого гелия, производимого на высокоэффективных многоступенчатых ожижителях, подобных описанным в разделе 3.1. Жидкий гелий из ожижителя ОГ при давлении 130 кПа и температуре 4,5 К направляется в систему переохлаждения. Холодопроизводительность системы обеспечивается гелиевым рефрижератором с избыточным обратным потоком, в нижней ступени которого установлена ванна жидкого гелия с температурой 1,6 К при давлении примерно 0,6 кПа. Проходя рекуперативный теплообменник и змеевик ванны, гелий охлаждается до температуры примерно 1,7 К и поступает в ресивер сверхтекучего гелия, из которого распределяется на две ветви. В правой ветви установлен «сверхтекучий» сепаратор с подводом теплоты, через который устремляется сверхтекучая компонента ^4He . После рекуперации холода жидкий гелий сливается в систему хранения, из которой отгружается потребителям. По левой ветви смесь нормальных компонент ^3He и ^4He в количестве примерно 0,0002 % от общего количества жидкого гелия поступает в нижнюю часть ректификационной колонны. Паровое питание колонны обеспечивается подводом теплоты в испарителе; флегмовое питание — работой конден-

сатора в верхней части колонны, охлаждаемого небольшой частью сверхтекучего гелия.

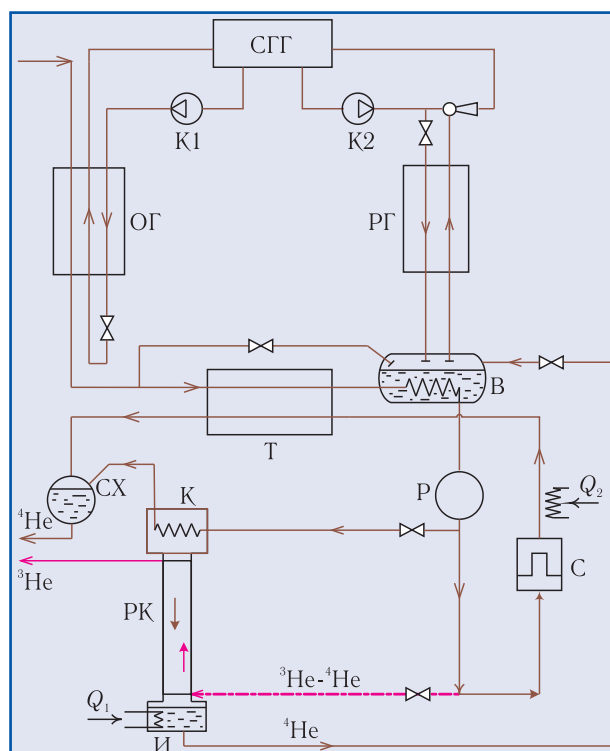


Рис. 6. Структурно-функциональная схема ожижения гелия и извлечения ^3He из жидкого гелия: СГГ — система подготовки газообразного гелия; К1, К2 — компрессоры ожижителя и рефрижератора; ОГ — ожижитель гелия; РГ — рефрижератор на 1,6 К; Т — рекуперативный теплообменник; В — ванна (1,6 К); СХ — система хранения жидкого гелия; Р — ресивер сверхтекучего гелия; РК — ректификационная колонна; К — конденсатор; И — испаритель; С — сепаратор сверхтекучего гелия

Продукционный ^3He отводится из верхней части колонны, а жидкий ^4He из куба колонны сбрасывается в вакуумное пространство ванны.

Разумеется, здесь приведено описание схемы в общих чертах. В частности, не раскрываются детали организации трёхступенчатого охлаждения в ваннах с последовательным понижением давления за счёт эжекторной откачки парового пространства. Существуют варианты рефрижератора с холодными компрессорами, требующие конкретной и детальной проработки. Кажется привлекательным использование в конечной ступени дроссельного цикла на ^3He . Вариант с эжекторной откачкой опробован нами в рефрижераторе РГ-50/1,8.

Приближённые расчётные оценки показывают, что на базе ожижителя ОГ-2400 предлагаемая установка позволит производить до 0,3 нл/ч ^3He с удельными затратами энергии на извлечение ^3He примерно 1500 кВт·ч/нл. Приведённые в настоящем разделе технические решения и количественные оценки ни в коей мере не свидетельствуют о необходимости организации извлечения ^3He при производстве жидкого гелия из природного газа Восточной Сибири и Даль-

него Востока, а дают лишь начальные и ориентировочные сведения для изучения проблемы государственными структурами и экономистами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный обзор преследует цель определить круг технических проблем переработки природных газов, возникающих при освоении гелийсодержащих месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока, с позиций опыта и возможного участия ОАО «Криогенмаш» в разработке и поставке криогенного оборудования.

Выполненный анализ показывает, что значительная часть технологических процессов может быть обеспечена в разработке и производстве на базе практического опыта ОАО «Криогенмаш». В частности:

— предложенная на основе опыта создания крупных ВРУ детандерная технология и оборудование холодильных циклов позволяют на современном уровне комплексно решать задачи переработки природного газа с выделением ШФЛУ, этановой фракции, гелиевого концентрата и производства СПГ;

— отработанные многолетней практикой создания гелиевых, водородных, кислородных систем криогенно-адсорбционные технологии разделения и тонкой очистки технических и редких газов для ракетно-космической техники, а также систем сверхпроводимости обеспечивают разработку и изготовление оборудования для очистки гелиевого концентрата и ожижения гелия в промышленных масштабах;

— комплекс НИОКР в области процессов в сверхтекучем гелии и ^3He представляет необходимую основу разработки оборудования для извлечения ^3He из жидкого гелия;

— опыт разработки и успешной эксплуатации гелиевых (до 40 м³) и водородных (до 250 м³) резервуаров, транспортных водородных железнодорожных и автомобильных цистерн емкостью 45 и 100 м³, трубопроводов для жидкого и сверхтекучего гелия составляет базу создания оборудования для хранения и транспортирования жидкого гелия в больших масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Smith D.M., Goodwin T.W., Schillinger J.A.** Challenges to the Worldwide Supply of Helium in the Next Decade// *Advances in Cryogenic Engineering*. — 2003. — V. 49A. — P. 119-135.
2. A Three Party Global Helium Resource Study/ **R.H. Clark, N. Ward, Z. Cai et al.**// *CryoPrague* 2006. — V. 2. — P. 215-218.
3. **West J.E.** Helium Extraction and Production Techniques// *Speciality Gas Report*. — 2009. — Q3. — P. 7.
4. Modeling Helium Markets/ **Z. Cai, R. Clarke, N. Ward et al.**// *International Congress of Refrigeration 2007, Beijing*. — P. 119-135.
5. Cryogenic Complexes in Russian Federation for Liquid Helium Production and Prospects of Helium Industry Development in Russia/ **V.N. Udut, V.N. Stolypin, Y.O.-V. Polotnyuk et al.**// *CryoPrague* 2006. — V. 2. — P. 211-214.
6. **Lemak R.J.** Helium: Solving the World's Projected Supply Shortages and Maintaining Viable Economics for A Unique Molecule// *Air Products and Chemicals, Inc.*, PA. 18195-1501.
7. The Ras Laffan Helium Purification Unit/ **F. Andrieu, J.M. Tsevery, N. Schmitt et al.**// *CryoPrague* 2006. — V. 2. — P. 207-210.
8. Air Liquide DTA Mines Helium in Qatar// *Cold Facts*. — 2005. — V. 21. — No 4. — P. 22.
9. **Dr. Istadi.** Trace Component Recovery and Removal// *Teknologi Pemrosesan Gas, TKK 564*: <http://tekim.indip.ac.id/stai/istadi>.
10. Helium// *AirGas*. — 2007. — February, 24th. — P. 7.: <http://www.ibaonline.net/Portals/0/Helium%20Slide%20presentation-AirGas.pdf>.
11. Cliffside Refiners, TX: Turnkey Helium Enrichment and Nitrogen Rejection Unit Integration// *Air Products*: <http://www.airproducts.com>.
12. **Кузьменко И.Ф., Передельский В.А., Довбиш А.Л.** Установки сжижения природного газа на базе детандерных азотных циклов// *Технические газы*. — 2010. — № 2. — С. 39-43.
13. **Benkrid A.H.** Diversifying Revenue Streams in Natural Gas Processing// *Air Products*. 2006 US-Algeria Energy Forum, May 15-16.
14. Научно-технические основы разработки криогенных гелиевых систем/ **И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Ю.И. Духанин, К.В. Безруков**// *Технические газы*. — 2009. — № 3. — С. 25-29.
15. **Бармин Н.В., Морковкин И.М.** Резервуары для хранения и перевозки жидкого гелия вместимостью до 40 м³// *Химическое и нефтяное машиностроение*. — 1995. — № 2. — С. 32-33.
16. Опыт создания крупномасштабного оборудования для получения, хранения и транспортирования жидкого водорода/ **И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Г.И. Сайдадь и др.**// *Технические газы*. — 2009. — № 2. — С. 31-37.
17. **Shea D.A., Morgan D.** The Helium-3 Shortage: Supply, Demand, and Options for Congress// *Congressional Research Service*, December 22, 2010. — 31 p.
18. US Government Approach to Addressing the He-3 Shortage/ **J. Bentz, N. Founds, J. Glaser et al.**// *Nuclear Defense Policy*: <http://cstsp.aaas.org/Helium3/USGApproach.pdf>.
19. **Harrison H. Schmitt.** Return to Moon. Exploration, Enterprise, and Energy in Human Settlement of Space. — New York: Praxis Publishing, Ltd., 2006. — 335 p.
20. **Кузьменко И.Ф., Лебедев Л.Б.** Разделение смеси He³-He⁴ методом низкотемпературной ректификации// *Химическое и нефтяное машиностроение*. — 1995. — № 2. — С. 38-39.
21. **Listerman T.W.** Equilibrium Properties of a Superfluid Separator for Enriching the Concentration of He³// *Journal Chem. Phys.* — 1969. — V. 51. — P. 4330-4335.
22. **Hendry P.C., McClintock P.V.E.** Continuous Flow Apparatus for Preparing Isotopically Pure He⁴// *Cryogenics*. — 1987. — V. 27. — P. 131-138.
23. **Бронштейн А.С., Кузьменко И.Ф.** Разделение изотопов гелия методом низкотемпературной ректификации// *Химическое и нефтяное машиностроение*. — 1991. — № 6. — С. 28-30.
24. **Wilkes W.R.** A Continuous-Distillation Apparatus for the Separation of He³ from He⁴// *Advances in Cryogenic Engineering*. — 1971. — V. 16. — P. 298-301.