

РОЗДІЛ 1**ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА**

УДК 621.564.27

Ю.М. Симоненко

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕОНА И ГЕЛИЯ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

Рассмотрена классическая технология переработки неонгелиевого концентрата. Обоснована необходимость снижения удельных затрат энергии на получение легких инертных газов. Выявлены резервы уменьшения эксплуатационных расходов при переработке отдувочного потока, состоящего из неона и гелия. Предложено включить в схему мембранный модуль, в котором происходит отделение неонного потока и одновременное обогащение смеси гелием. Экономичность технологии получения неона и гелия повышается за счет увеличения длительности цикла работы криогенных адсорберов и снижения числа компрессоров.

Ключевые слова: Неон – Гелий – Сепаратор – Ректификационная колонна – Компрессор – Адсорбер – Мембранный модуль.

Ю.М. Симоненко

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ОТРИМАННЯ НЕОНА І ГЕЛІЯ ВИСОКОЇ ЧИСТОТИ

Розглянута класична технологія переробки неонгелієвого концентрату. Обґрунтована необхідність зниження питомих витрат енергії на отримання легких інертних газів. Виявлені резерви зменшення експлуатаційних витрат на переробку побічного потоку, який містить неон та гелій. Запропоновано включити в схему мембранный модуль, в якому відбувається відділення неонного потоку і водночас збагачення суміші гелієм. Економічність технології отримання неону і гелію підвищується за рахунок збільшення тривалості циклу роботи криогенних адсорберів і зниження числа компресорів.

Ключові слова: Неон – Гелій – Сепаратор – Ректифікаційна колона – Компресор – Адсорбер – Мембранный модуль.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сырье для извлечения легких инертных газов (Ne и He) получают одновременно с выделением кислорода из атмосферы. Как правило, крупные воздуходелительные установки позволяют производить неонгелиевую смесь с содержанием целевых продуктов около 50 %. В качестве побочных примесей в концентрате преобладают азот и водород. Очистку от H_2 обычно проводят с использованием реакции окисления $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. Неон и гелий являются инертными газами, поэтому их разделение возможно только физическими методами. Процессы обогащения и тонкой очистки осуществляются при температурах $T = 30...78$ К. Криогенное обеспечение сепарации на таком температурном уровне связано со значительными эксплуатационными расходами. В условиях обострения конкуренции и повышения цен на энергоносители переход к энерго- и ресурсосберегающим технологиям становится особенно актуальным.

II. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НЕОНА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

Совокупность отдельных этапов производства неона и гелия схематически показана на рисунке 1. Процесс условно можно разделить на несколько стадий [1]:

I. Приемка баллонов с исходной смесью, которую доставляют из нескольких источников (обычно – из кислородных цехов металлургических предприятий).

II. Очистка смеси от водорода химическим методом; поглощение и удаление продукта реакции (H_2O) путем конденсации и адсорбционным методом при температуре окружающей среды.

III. Обогащение смеси путем конденсации большей части находящегося в ней азота в дефлегматоре при температурах $T = 68...77,4$ К.

IV. Глубокая (окончательная) очистка смеси от азота и других примесей в адсорберах при температуре жидкого азота ($T = 77,4$ К).

V. Разделение неонгелиевой смеси в колонне при $T \approx 30$ К, сопровождаемое получением чистого неона и образованием гелиевой отдувки ($y_{\text{He}} \approx 80$ %).

VI. Переработка отдувочного потока в адсорбере при температуре жидкого азота ($T = 77,4$ К), сопровождаемая получением чистого гелия и возвратного потока неонowego концентрата ($y_{\text{Ne}} \approx 75$ %).

Задача настоящей статьи – повышение экономичности последних двух (пп. V и VI) стадий переработки неонгелиевого концентрата. Типовая схема блока для разделения неонгелиевой смеси показана на рисунке 2 [2]. В циркуляционный компрессор К1 поступает очищенная неонгелиевая смесь с природным соотношением неона и гелия (порядка 75 % Ne и 25 % He) и давлением $P = 0,13$ МПа (абс.). После сжатия до давления $P = 2,5$ МПа поток последовательно охлаждается в основном рекуперативном теплообменнике ТО1, азотной ванне АВ и низкотемпературном теплообменнике ТО2 до температуры ниже 40 К. При этих условиях неон в потоке сжатой смеси частично сжижается. Процесс охлаждения смеси до температуры $T = 30...31$ К происходит в теплообменнике ТО3, а затем в змеевике ИК. За счет теплового контакта с неоном, кипящим в кубе ректификационной колонны РК, большая часть смеси переходит в жидкое состояние. Парожидкостная смесь неона и гелия разделяется в сепараторе ФС. При этом отдувочный газ с концентрацией 20 % Ne (остальное – гелий) отводится из верхней части сепаратора ФС в качестве побочного продукта. Гелиевая отдувка сепаратора сжимается компрессором К3 и собирается в ресивере высокого давления РВД 1 для дальнейшей переработки.

Таблица 1 – Качество производственного неона и содержание побочных примесей, (%)

НЕОН	Ne	99,999
Водород	H ₂	0,00005
Гелий	He	0,0005
Азот	N ₂	0,0001
Кислород	O ₂	0,00005
Оксиды углерода	CO+CO ₂	0,0001
Вода	H ₂ O	0,0001

Из нижней части сепаратора ФС отбирается жидкость, состоящая на 98% из неона (остальное – гелий). Обогащенная неоном смесь дросселируется в вентиле ДР и подается в контактное пространство ректификационной колонны РК. Малорасходный поток обогащенной гелием отдувки из верхней части ректификационной колонны РК поступает на вход в циркуляционный компрессор К1. В кубе ректификационной колонны РК получают чистый производственный неон, который испаряется в низкотемпературном теплообменниках ТО3, а затем последовательно нагревается в ТО2 и ТО1 до $T = 260...280$ К. Через теплообменники ТО2 и ТО1 также проходит поток отдувочного

газа сепаратора ФС и гелиевая отдувка ректификационной колонны РК.

В получаемом неоне сумма примесей не превышает 10-ти миллионных долей (10 ppm). Типовой состав товарного и побочных продуктов показан в таблице 1.

III. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЯ МЕТОДОМ АДСОРБЦИИ

Как следует из схемы (рисунок 2) при получении неона образуется отдувка с содержанием гелия около $y_{\text{He}} = 80$ %. Этот газ выводят из установки и накапливают в ресивере высокого давления РВД 1. Переработка отдувочного потока методом ректификации в блоке V (рисунок 1, 2) неэффективна. Возврат отдувочного газа (с целью переработки) обратно в контур V приведет к накоплению в нем гелия и утрате работоспособности ректификационной колонны РК. Утилизацию такой смеси обычно проводят в отдельном блоке (VI) методом адсорбции.

При пропускании гелиевой отдувки через охлажденный адсорбер А получают на выходе поток чистого гелия. Неон из потока смеси поглощается в слое сорбента. После насыщения адсорбера его отогревают и получают неоновый концентрат, с содержанием неона около 70...80 %. Этот ценный продукт возвращается на вход в блок V получения неона высокой чистоты (рисунок 1, 2).

Как правило, для качественного разделения отдувочной смеси, сопровождаемого извлечением спектрально чистого гелия, температура в адсорбере обеспечивалась на уровне 28 К, [3, 4]. Обычно такие установки имели только одну адсорбционную секцию и, следовательно, производили гелий периодически. Очевидными преимуществами сепараторов на неоновом уровне температур казались два неоспоримых фактора: значительная статическая емкость сорбентов a_{Ne} и возможность предварительного обогащения смеси с y_{Ne} от 80 до 90% за счет конденсации половины неона в фазовом сепараторе [5, 6]. Однако производство гелия при $T \approx 28$ К требует значительных капитальных затрат на создание контура криогенное обеспечение и сопровождается большими расходами хладагента и энергии (таблица 2). Поэтому естественным шагом разработчиков новой техники явились попытки создания относительно «высокотемпературных» систем на азотном уровне температур (68...78 К).

Для сопоставления энергетических показателей адсорбционных технологий разделения отдувочного потока в интервале температур $T = 28...80$ К создана многоцелевая опытно-промышленная установка (рисунки 3, 4). Ее блоки размещались в шести гелиевых криостатах и допускали относительно просто изменять варианты схем. В первом криостате КР1 диаметром $D = 150$ мм расположены теплообменник ТО1 и азотный змеевик ЗА для предварительного охлаждения потока до $T \approx 100$ К.

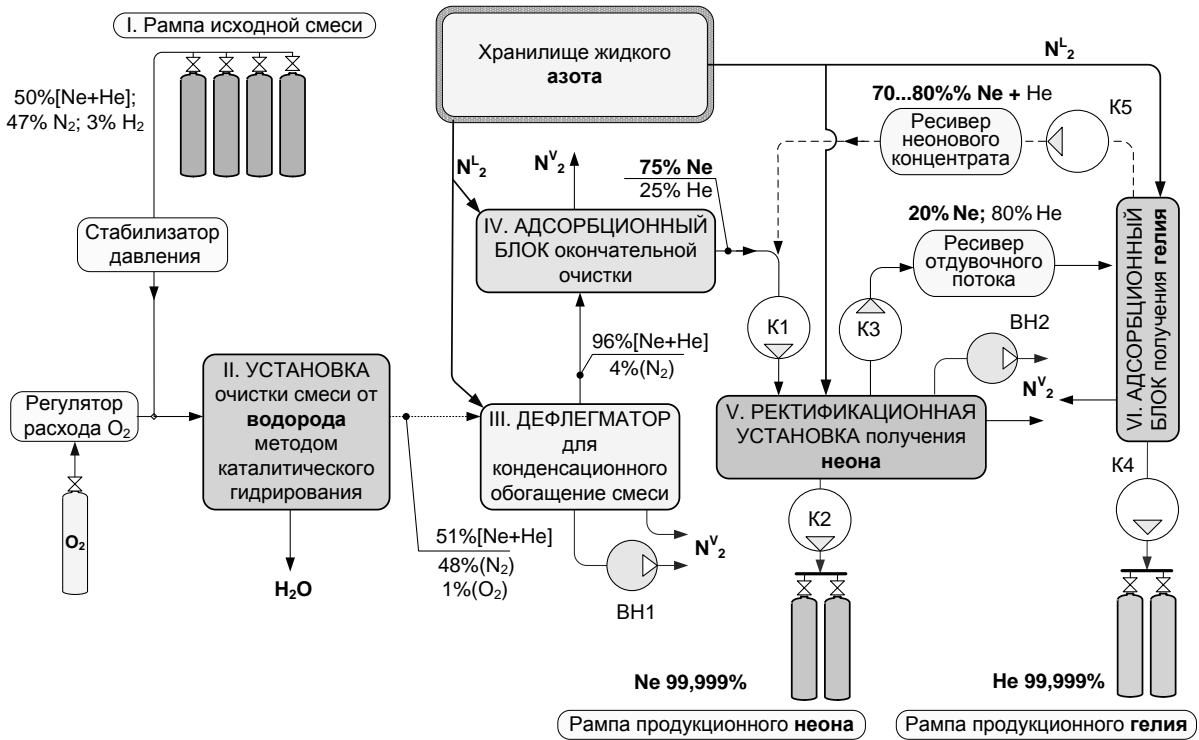


Рисунок 1 – Упрощенная схема технологической последовательности переработки неонгелиевой смеси
 K1...K5 – мембранные компрессоры, ВН1...ВН2 – вакуум-насосы, N₂^L – жидкий азот, N₂^V – газообразный азот

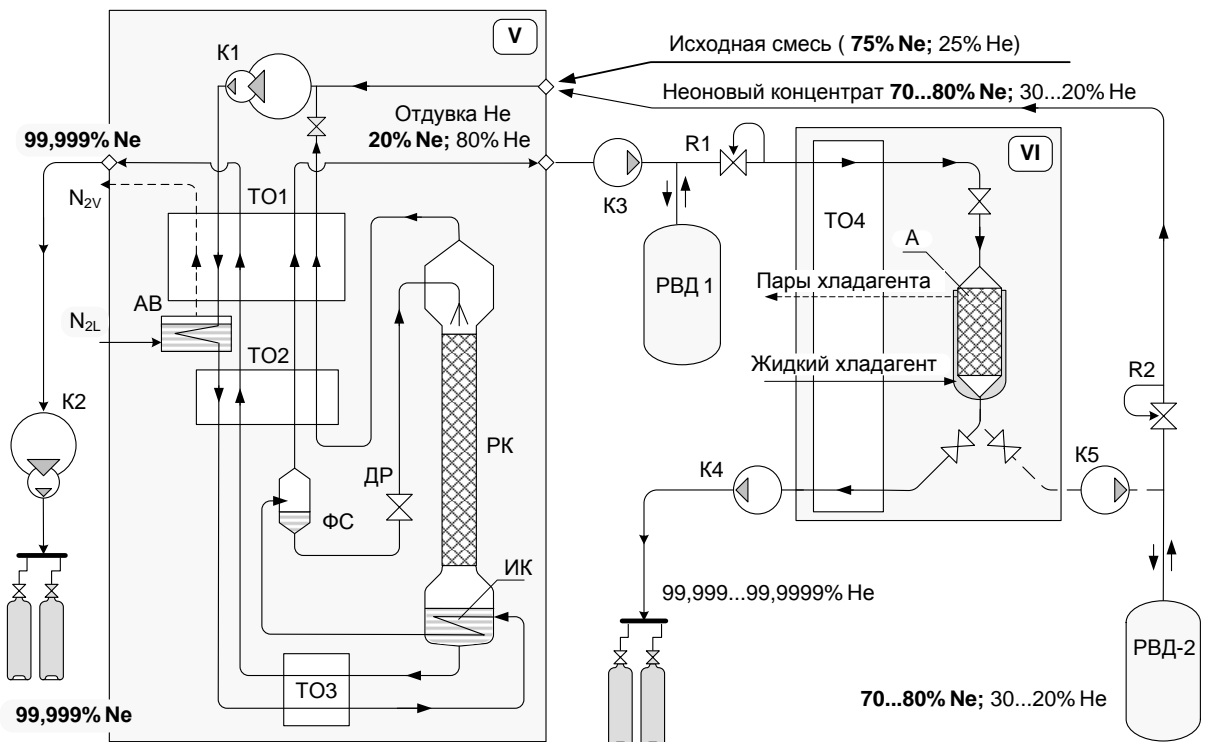


Рисунок 2 – Классическая схема комплекса для получения неона и гелия высокой чистоты [1]

Блоки V и VI согласно рисунку 1. ТО1-ТО4 — теплообменники; АВ — азотная ванна; ИК — змеевик в кубе колонны; выполняющий функции испарителя-конденсатора; ФС — фазовый сепаратор; РК — ректификационная колонна; А — адсорбер; РВД1, РВД2 – ресиверы высокого давления; R1, R2 – редукторы; K1...K5 — мембранные компрессоры

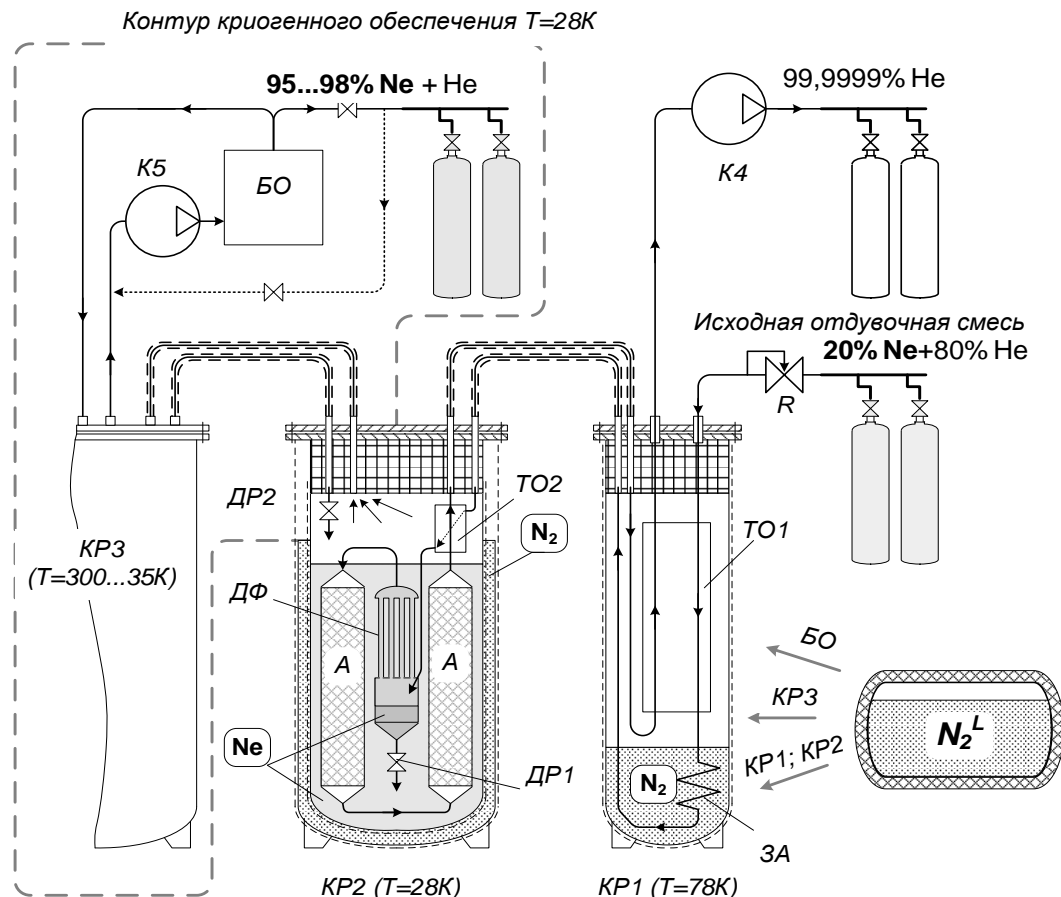


Рисунок 3 – Блок адсорберов для периодического получения спектрально чистого гелия из отдувки неонového производства на уровне температур $T=28\text{ K}$

KP1 – криостат предварительного охлаждения смеси; R – питающий редуктор; ЗА – змеевик азотной ванны; K4 – мембранный компрессор чистого гелия; KP2 – криостат блока очистки; ТО1...ТО2 – теплообменники; ДФ – дефлегматор; ДР1 – дроссель дефлегматора; ДР2 – дроссель неонového цикла; А – секции адсорбера; KP3 – криостат неонového холодильного цикла; K5 – поршневой компрессор; БО – блок очистки рабочего тела и извлекаемого в дефлегматоре неона

Таблица 2 – Сопоставление эксплуатационных характеристик опытных установок для периодического разделения неонгелиевой отдувки $y_{\text{He}} = 80\%$ с получением гелия $y_{\text{He}} \geq 99,9999\%$.

Уровень рабочих температур, К		28	68	80
Концентрация примеси (Ne) на входе, %		11*	19	19
Число блоков (криостаты КГ-60/300)		1	3	3
Исследованный диапазон относительной длины L/D		130...300	160...480	
Оптимальные значения относительной длины канала L/D		250	300	350
Суммарный объем адсорберов, дм^3		35	230	230
Масса сорбента		23,8	100	100
Тип сорбента		Силикагель	Уголь СКТ-4	
Статическая сорбционная емкость по примеси (неону) a_{Ne} , н.м ³ /кг		0,62	0,23	0,19
Длительность периода (работа/всего), ч		13,5/32	10,7/22	8,8/20
Производительность по гелию	$\text{м}^3/\text{цикл}$	110	190	160
	$\text{м}^3/\text{сутки}$	80	200	185
Удельный расход жидкого азота, $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ гелия})$		6,8	4,8	5,0
Удельный расход электроэнергии, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3 \text{ гелия})$		2,2	1,3	1,0

* - при работе с предварительным дефлегматором ДФ (рисунок 3).

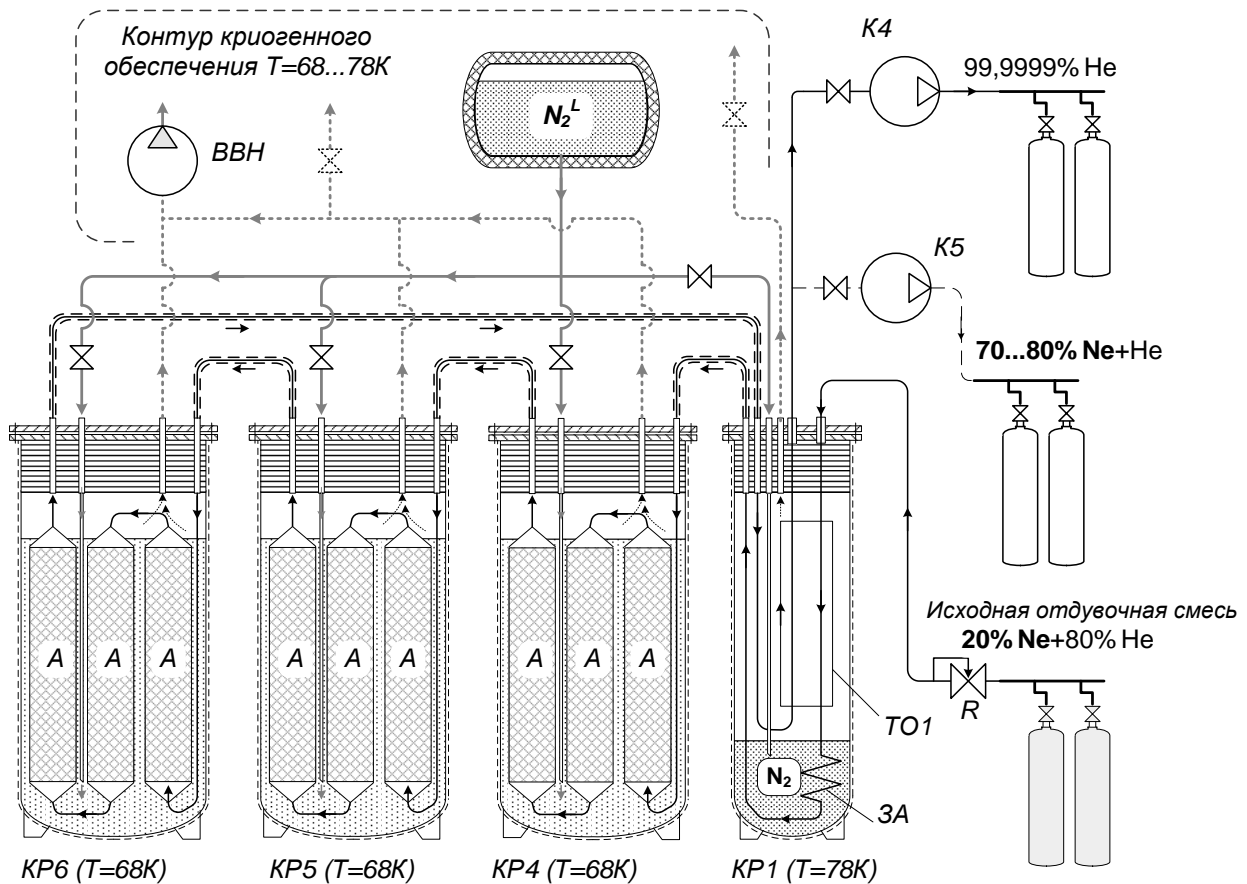


Рисунок 4 – Блок адсорберов для периодического получения гелия при азотных температурах (обозначения см. на рисунке 3)

Во втором криостате KP2 ($D = 300$ мм) были установлены узлы адсорбера, работающего на неоновом уровне температур: дроссель неонowego цикла ДР2, теплообменник ТО2 для охлаждения смеси до $T \approx 30$ К, дефлегматор ДФ и шесть секций адсорбера А, заполненных силикагелем (рисунок 3, таблица 2). В криостате KP3 помещался неоновый ожижитель высокого давления с предварительным охлаждением неона в азотной ванне.

На рисунке 4 показана схема экспериментальной адсорбционной установки для изучения процесса разделения неонгелиевой смеси при $T=66...78K$. В качестве предварительного охладителя смеси использован криостат KP1. Адсорберы были установлены в ваннах с кипящим жидким азотом ($P_{абс}=0,03...0,1$ МПа) в криостатах KP4...KP6. Они представляли собой модифицированный вариант КГ 60/300. Но в них были исключены внутренние (гелиевые) колбы и использованы только внешние (азотные) оболочки. За счет этого удалось увеличить диаметр полезного отсека криостата до $D=400$ мм и расположить в нем 12-ти секционные адсорберы суммарной протяженностью слоя сорбента (уголь СКТ-4) более 40 метров. Сравнительные характеристики трех видов адсорбционной техники и обобщенные результаты испытаний и представлены в таблице 2.

IV. СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГЕЛИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Удельные эксплуатационные расходы в процессе периодической адсорбции зависят от количества переработанной смеси за один цикл. Этот показатель, в свою очередь, определяется емкостью адсорбера по отношению к поглощаемому компоненту (неону). Время защитного действия адсорбера при прочих равных условиях зависит от концентрации поглощаемого компонента в смеси. В рассматриваемом случае, чем меньше неона в отдувочном потоке на входе в адсорбер, тем больший объем смеси будет переработан до «проскока». Соответственно, будет получено больше гелия за один цикл работы, а затраты на производство одного m^3 He уменьшатся.

Снизить нагрузку на адсорбционный блок разделения неонгелиевой отдувки способен мембранный модуль [7, 8]. Работа данного устройства основана на различной проницаемости отдельных компонентов смеси через материал мембраны. Эти различия характеризуются фактором разделения, который для системы He-Ne равен $\alpha = 4...5$. Т.е. при одинаковом перепаде давлений через единицу площади мембраны гелий будет проникать в несколько раз интенсивнее, чем неон.

Отличиями предлагаемой технологии является переход к ресиверам среднего давления и исключение из схемы компрессоров К3 и К5. Такое решение стало возможным благодаря использованию двухаппаратного блока адсорберов VI. В свою очередь адсорберы А1 и А2 включены в межступенчатую линию компрессора К4, используемого для наполнения баллонов с чистым гелием [9].

Схема комбинированного устройства на основе мембраны и блока адсорберов показана на рисунке 5. Из ресивера РСД-1 через редуктор R1 отдувочный газ подается в полость MB избыточного давления мембранного модуля. Под действием разности давлений часть смеси (преимущественно гелий) проникает через селективный слой M в полость MN низкого давления мембранного модуля. За счет различных проницаемостей компонентов смеси в полости MN получают поток обогащенного гелия с концентрацией $y = 94\% \text{ He}$ (остальное – неон).

По мере прохождения отдувочного неонгелиевого потока через полость MB избыточного давления в смеси повышается концентрация неона. С содержанием $y = 73...77\% \text{ He}$ (остальное

$1-y = 27...23\% \text{ Ne}$) обогащенный неон выводится из мембранного модуля и поступает в блок V. На входе в циркуляционный компрессор К1 (рисунки 1, 2) неоновый концентрат смешивается с основным потоком исходной смеси, подаваемой в блок получения неона V.

В зависимости от соотношения расходов, отбираемых из полостей MB и MN, после разделения в мембранном модуле устанавливаются те или иные концентрации неона и гелия. При этом уменьшение расхода через регулятор PP приводит к повышению концентрации неона в точках a1 и a2.

Для стабильной работы установки необходимо, по возможности, согласовать концентрации потоков, смешиваемых на входе в циркуляционный компрессор К1. Эту функцию автоматически выполняет регулятор расхода PP, приводимый в действие с помощью исполнительного механизма ИМ. В качестве управляющего импульса использован выходной сигнал газоанализатора ГА, который регистрирует отклонение концентрации смеси в точке a2 от оптимальной (в точке a3). Мощность сигнала повышают в усилителе У.

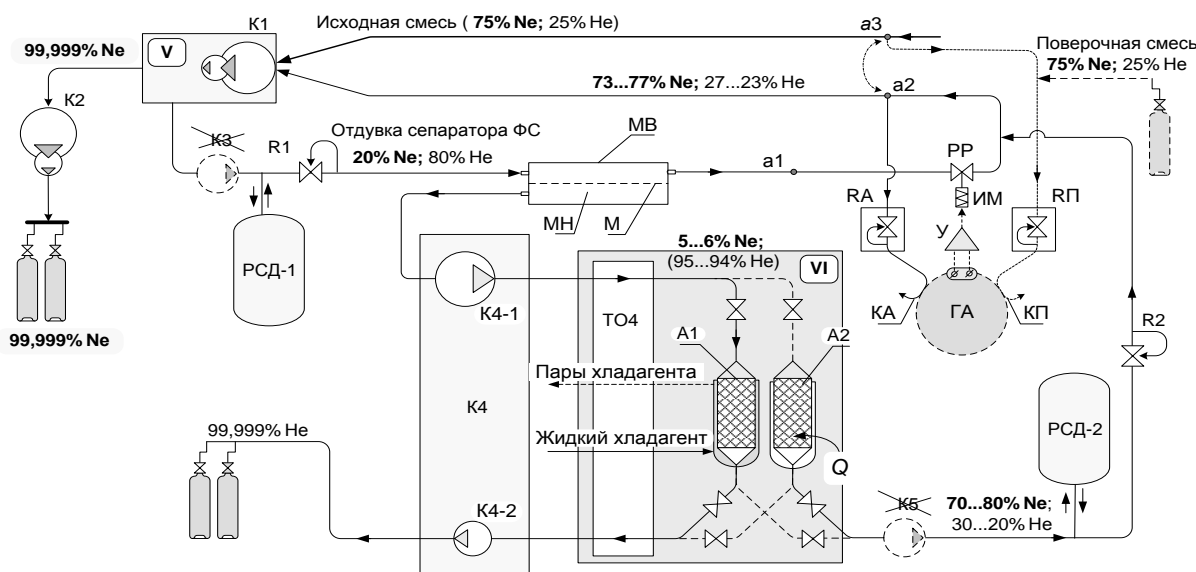


Рисунок 5 – Схема комплекса для непрерывного получения неона и гелия высокой чистоты с использованием мембранного модуля [9]

Блоки V и VI согласно рисунку 2. РСД-1 и РСД-2 – ресиверы среднего давления, R1, R2, RA, RP редукторы; M – мембрана; MB и MN – полости избыточного и низкого давления мембранного модуля; a1...a3 – точки отбора газа в анализатор; К1...К5 – компрессоры; К4-1 и К4-2 – ступени компрессора К4; ГА – газоанализатор; КА и КП – контуры анализируемого продукта и поверочной смеси газоанализатора; ГА; У – усилитель; ИМ – исполнительный механизм; PP – регулятор расхода непериодического потока, обогащенного неона; Q – нагреватель адсорбера

Газоанализатор ГА выполнен на основе детектора теплопроводности и представляет собой сравнивающее устройство. В контур анализируемого газа КА и в контур поверочной смеси КП подаются малорасходные ($< 2 \text{ дм}^3/\text{час}$) газовые

потоки. Анализируемая смесь отбирается из точки a2 через редуктор RA. В качестве эталонной смеси в контуре КП используется поверочная смесь из баллона, с концентрацией неона $y = 75\% \text{ Ne}$ либо поток, отбираемый из линии исходного продукта

(точка а3) через редуктор РП. Если концентрация анализируемой смеси y_2 в точке а2 идентична составу поверочной смеси в точке а3 (в частном случае $y_3=75\%$ Ne) то схема измерительного моста ГА будет сбалансирована, и на входе в усилитель У будет наблюдаться нулевой сигнал.

Если концентрация Ne в точке а2 и в контуре КА анализируемого газа упадет (сместится в сторону He, например, до $y_2 = 73\%$ Ne), то равновесие схемы измерительного моста в составе анализатора ГА будет нарушено и на входе усилителя У возникнет разность потенциалов. Этот сигнал усиливается до уровня, достаточного для срабатывания исполнительного механизма ИМ. Проходное сечение регулятора РР уменьшится. При этом снижается расход смеси через РР и концентрация обогащенного неона в точке а2 восстановится до уровня $y_2 = y_3 = 75\%$.

Аналогично, при повышении концентрации Ne в точке а2 анализируемого газа (например, до $y_2 = 77\%$) в газоанализаторе ГА сформируется сигнал, но с противоположным знаком. Проходное сечение регулятора расхода РР увеличится. Расход обогащенного неона возрастет, а концентрация неона в потоке упадет с $y_2 = 77\%$ до $y_3 = 75\%$. Поддержание состава обогащенного неона, подаваемого в качестве дополнительного потока на вход в циркуляционный компрессор К1, способствует стабильной эксплуатации блока V (рисунок 1, 2).

За счет отбора неоновой концентрации $y = 73...77\%$ Ne из полости МВ, поток, проникший через мембрану, будет обогащен гелием. Средний состав такой смеси на выходе из полости низкого давления МН соответствует $y_{Ne} = 5...6\%$, $y_{He} = 94...95\%$. Уменьшение концентрации неона перед адсорбционным блоком VI способствует увеличению длительности рабочего периода. При этом возрастают объем перерабатываемой смеси и получаемого гелия за один цикл, в то время как затраты хладагента остаются примерно на прежнем уровне.

Адсорбционный блок VI может быть включен в разрыв межступенчатой линии компрессора К4. При этом промежуточное давление определяется абсолютными давлениями во всасывающей линии первой ступени К4-1 (в полости МН) и в нагнетательной линии К4-2 (баллонах с He). Обычно эти давления составляют, соответственно, $P_{B1} = 0,12$ МПа, $P_{H2} = 15...20$ МПа. Отношение давлений равно суммарной степени сжатия компрессора К4. В нашем примере

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{P_{H2}}{P_{B1}} = 125...167 \quad (1)$$

Аналогично степени сжатия первой К4-1 и второй К4-2 ступеней, соответственно, равны

$$\varepsilon_1 = \frac{P_{H1}}{P_{B1}} \approx \frac{P_{B2}}{P_{B1}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{P_{H2}}{P_{B2}} = \frac{P_{H2}}{P_{H1}}. \quad (3)$$

Предпочтительными условиями эксплуатации является такие, при которых

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon_{\Sigma}} = 11,2...12,9. \quad (4)$$

В рассматриваемом примере это соответствует давлению $P_{АДС} = P_{H1} \approx P_{B2} = P_{B1} \cdot \varepsilon_1 = 1,34...1,55$ МПа.

Для оценки влияния мембранного модуля М на параметры работы блока VI воспользуемся модифицированными формулами Ленгмюра для расчета поглощающих способностей a_{NE} и a_{HE} в условиях вытеснительной адсорбции двух веществ – неона и гелия [1]

$$a_{NE} = a_{NE}^m \cdot \frac{b_{NE} \cdot P \cdot y_{NE}}{1 + b_{NE} \cdot P \cdot y_{NE} + b_{HE} \cdot P \cdot y_{HE}}, \quad (5)$$

$$a_{HE} = a_{HE}^m \cdot \frac{b_{HE} \cdot P \cdot y_{HE}}{1 + b_{NE} \cdot P \cdot y_{NE} + b_{HE} \cdot P \cdot y_{HE}}, \quad (6)$$

где y_{NE} и $y_{HE} = (1 - y_{NE})$ – объемные доли неона и гелия на входе в адсорберы; P – давление смеси; a_{NE}^m ; b_{NE} и a_{HE}^m ; b_{HE} – константы, определяемые экспериментально. Для активированного угля при $T = 77,4$ К:

$$a_{NE}^m = 326 \text{ см}^3/\text{г} = 0,326 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (адсорбента)};$$

$$b_{NE} = 2,85 \text{ [1/МПа]};$$

$$a_{HE}^m = 78,7 \text{ см}^3/\text{г} = 0,0787 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (адсорбента)};$$

$$b_{HE} = 0,237 \text{ [1/МПа]}.$$

Примем исходные данные: давление в адсорбере $P = 1,3$ МПа (абс); температура $T = 77,4$ К; концентрация неона в отдувке, направляемой непосредственно в адсорбер $y'_{NE} = 0,2$ (20%); концентрация неона в обогащенном гелии, направляемом в адсорбер из мембранного модуля $y''_{NE} = 0,05$ (5%).

Для этих условий вычислим поглощающую способность адсорбера по неону a_{NE} , $\left[\frac{\text{м}^3 \text{ Ne}}{\text{кг сорбента}} \right]$ в среде гелия по формуле (5).

Для прототипа (рисунок 2):

$$a'_{NE} = 0,326 \cdot \frac{2,85 \cdot 1,3 \cdot 0,2}{1 + 2,85 \cdot 1,3 \cdot 0,2 + 0,237 \cdot 1,3 \cdot 0,8} = 0,122$$

Для комплекса с мембраной (рисунок 5):

$$a''_{NE} = 0,326 \cdot \frac{2,85 \cdot 1,3 \cdot 0,05}{1 + 2,85 \cdot 1,3 \cdot 0,05 + 0,237 \cdot 1,3 \cdot 0,95} = 0,0409$$

При расходе отдувки $V = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$ и содержании в ней неона $y'_{NE} = 20\%$ (для прототипа) в адсорбер будет поступать $v'_{NE} = V \cdot y'_{NE} = 20 \cdot 0,2 = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ неона. Время рабочего периода (время защитного действия) адсорбера с массой активированного угля $m_c = 100$ кг равно

$$\tau' = \frac{m_c \cdot a'_{NE}}{v'_{NE}} = \frac{100 \cdot 0,122}{4} = 3,05 \text{ часа или}$$

$$N' = 7,9 \text{ цикла в сутки.}$$

Согласно таблице 3 за счет работы мембранного модуля в блок VI адсорберов будет подаваться поток с расходом $v'' = 15,71 \text{ м}^3/\text{ч}$ и средней концентрацией по неону всего $y''_{\text{NE}} = 5\%$. Таким образом, нагрузка адсорбера (расход по неону в составе потока обогащенного гелия) уменьшится и будет равна $v''_{\text{NE}} = 0,05 \cdot 15,71 = 0,78 \text{ м}^3/\text{ч}$ неона. Вре-

мя рабочего периода (время защитного действия) адсорбера с такой же массой $m_c = 100 \text{ кг}$ составит

$$\tau'' = \frac{m_c \cdot a''_{\text{NE}}}{v''_{\text{NE}}} = \frac{100 \cdot 0,0409}{0,78} = 5,24 \text{ часа} \quad \text{или}$$

$N'' = 4,6$ цикла в сутки.

Таблица 3 – Параметры потоков в характерных точках схемы установки для комплексного разделения неонгелиевой смеси (согласно рисункам 2, 5)

Наименование потока, магистрали	Концентрация, %		Расход, норм.м ³ /ч (в среднем)		
	Неон	Гелий	Всего	В том числе	
				по неону	по гелию
Линия подачи исходной смеси в установку V получения неона (рисунки 1, 2)	75	25	58,7	44,0	14,7
Выход циркуляционного компрессора К1; вход в сепаратор ФС (рисунки 1, 2)	75	25	67,8	50,85	16,95
Линия отдувочного потока сепаратора ФС; компрессор К3, редуктор R1 и вход в полость МВ мембранного модуля (рисунки 2, 5)	20	80	20	4,0	16,0
Жидкая фракция сепаратора ФС (рисунок 2)	98	2	47,8	46,85	0,95
Отдувка колонны РК (рисунок 2)	70...80	30...20	3,8	2,85	0,95
Кубовый продукт колонны РК, компрессор К2 (товарный неон)	99,999	<0,001	44,0	44,0	<0,001
Канал а1 (рисунок 5) вывода неонового концентрата из полости избыточного давления МВ мембранного модуля	73...77	27...23	4,29	3,22	1,07
Канал вывода обогащенного гелия из полости низкого давления МН мембранного модуля (рисунок 5)	4...6	96...94	15,71	0,78	14,93
Гелиевый канал блока VI переключающихся адсорберов, компрессор К4-2 (товарный гелий)	<0,001	99,999	14,67	<0,001	14,67
Неоновый канал переключающихся адсорберов, редуктор R2 (рисунок 5)	70...80	30...20	1,04	0,78	0,26

ВЫВОДЫ

Совокупное использование мембранного модуля и блока переключающихся адсорберов позволяет повысить экономичность переработки отдувочного Не-Не потока. Этот положительный эффект обеспечивается многостадийным разделением неонгелиевой отдувки в мембранном модуле и включенном последовательно с ним блоке адсорберов. Снижение затрат на криогенное и энергетическое обеспечение на 30...40 % достигается за счет сокращения частоты переключений адсорберов.

Использование в контуре VI двухаппаратного блока адсорбции обеспечивает практически стабильную подачу промежуточных смесей и целевого продукта. Это, в свою очередь, позволило перейти к ресиверам среднего давления и исключить

из схемы два компрессора (К3 и К5). Устойчивые концентрации получаемых в мембране потоков позволяют организовать возврат и утилизацию неонового концентрата в блоке получения неона V и окончательную очистку гелия в блоке переключающихся адсорберов VI. За счет такого решения комбинированная установка способна практически безотходно производить оба целевых продукта (неон и гелий) с минимальными потерями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные технологии извлечения редких газов. / Бондаренко В.Л., Ю.М. Симоненко // Одесса: «Астропринт». – 2013. – 332 с.
2. **V.L. Bondarenko, A.M. Arkharov, A.A. Golubev.** Pilot-Commercial Plant for High Purity Neon Produc-

tion // Preprints of the XX International Congress of Refrigeration. – Sydney. – 1999. – P. 1-5.

3. **Головко Г.А.** Криогенное производство инертных газов // Г.А. Головко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1983. – 416 с.

4. **А.М. Arkharov, V.L. Bondarenko, I.M. Symonenko.** Increasing of Separator Efficiency of Neon-Helium Mixture by Using the Unmachine Devices // Proc. 5 Int. Conf. «Cryogenics'98». – Praha. – 1998. – P. 70-73.

5. **Симоненко Ю.М.** Дроссельный цикл на неоне-гелиевой смеси в установке для разделения инертных газов / А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. Спецвыпуск «Криогенная и холодильная техника». – 1998. – С. 53-61.

6. **А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, С.Н. Пуртов и др.** Пути повышения коэффициента извлечения неона при разделении неоне-гелиевой смеси // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. Спецвы-

пуск «Криогенная и холодильная техника». – 1998. – С. 44-52.

7. Применение мембранных процессов в технологиях разделения газовых смесей на основе компонентов воздуха / В.Л. Бондаренко, Н.П. Лосяков, Ю.М. Симоненко и др. // Технические газы – 2012. – №2. – С. 19-30.

8. **Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М.** Установка для концентрирования неоне-гелиевой смеси. Патент № **2486948** Российской Федерации на изобретение. Приоритет 16.02.2012. № заявки 2012105213. Зарегистрировано в Госреестре 10.07.2013.

9. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение «Установка для мембранного разделения неонгелиевой смеси» по заявке 201300007/05(000006) от 09.01.2013, Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М.

Yu. M. Symonenko

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65039

ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN INSTALLATIONS FOR HIGH PURITY NEON AND HELIUM PRODUCING

Classical technology of neon-helium concentrate is considered. The necessity to reduce the specific energy consumption for the light inert gases is substantiated. The reserves of reducing the operating costs in the processing stream stripping are identified. It was proposed to include a membrane module in the scheme, wherein neon stream is separated and simultaneously the mixture is enriched with helium. Cost effectiveness of helium extraction technology is enhanced by increasing the duration of cryogenic adsorbers cycle and reducing the number of compressors.

Keywords: Neon – Helium – Separator – The distillation column – Compressor – Adsorber – Membrane module.

REFERENCES

1. Kriogennye tekhnologii izvlecheniya redkix gazov. / V.L. Bondarenko, Yu.M. Symonenko // Odessa: «Astroprint». – 2013. – 332 s.

2. **V.L. Bondarenko, A.M. Arkharov, A.A. Golubev.** Pilot-commercial plant for high purity neon production // Preprints of the xx international congress of refrigeration. – Sydney. – 1999. – P. 1-5.

3. **Golovko G.A.** Kriogennoe proizvodstvo inertnykh gazov // G.A. Golovko. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie, Leningr. отд., 1983. – 416 s.

4. **Arkharov A.M., Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M.** Increasing of separator efficiency of neon-helium mixture by using the unmachine devices // Proc. 5 int. conf. «Cryogenics'98». – Praha. – 1998. – P. 70-73.

5. **Simonenko Yu.M.** Drosselnyj cikl na neone-gelievoy smesi v ustanovke dlya razdeleniya inertnykh gazov / A.M. Arxarov, V.L. Bondarenko, Yu.M. Simonenko // Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie. Specvypusk «Kriogennaya i xolodilnaya tekhnika». – 1998. – S. 53-61.

6. **Arxarov A.M., Bondarenko V.L., Purto S.N. i dr.** Puti povysheniya koeffitsienta izvlecheniya neona pri razdelenii neone-gelievoy smesi // Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie. Specvypusk «Kriogennaya i xolodilnaya tekhnika». – 1998. – s. 44-52.

7. Primenenie membrannykh processov v tekhnologiyax razdeleniya gazovykh smesey na osnove komponentov vozduxa / V.L. Bondarenko, N.P. Losyakov, Yu. M. Simonenko i dr. // Texnicheskie gazy – 2012. – №2. – s. 19-30.

8. **Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M.** Ustanovka dlya koncentrirovaniya neone-gelievoy smesi. Patent № 2486948 Rossijskoj Federacii na izobretenie. Prioritet 16.02.2012. № zayavki 2012105213. Zaregistrirovano v gosreestre 10.07.2013.

9. Polozhitelnoe reshenie o vydache patenta RF na izobretenie «Ustanovka dlya membrannogo razdeleniya neonegelievoy smesi» po zayavke 201300007/05(000006) ot 09.01.2013, Bondarenko V.L., Simonenko Yu.M.

Отримана в редакції 12.06.2014, прийнята до друку 20.06.2014