

УДК 66.071.6.081.6

**Е.А. Ельчанинов, Н.П. Удалова**

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРА СПИРАЛЬНЫХ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Рассмотрены технологические особенности конструкций и производительность мембранных, центробежно-сепарационных и центробежно-мембранных установок. Выбрана и представлена наиболее эффективная газоразделительная установка.*

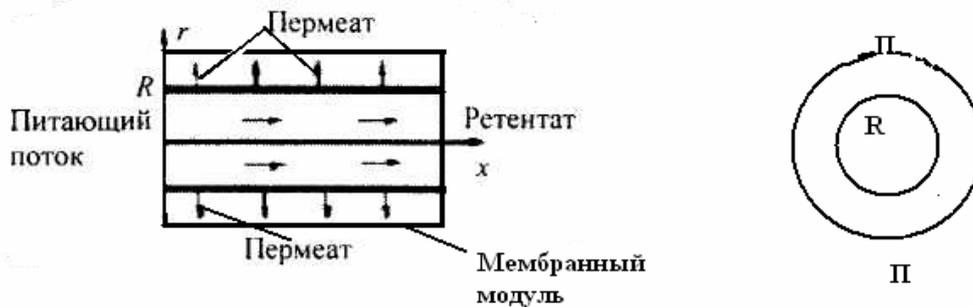
*Ключевые слова: метан, центробежно-сепарационный, мембрана, газоразделение, центробежно-мембранный, спиральный газоразделительный элемент.*

Основой мембранных газоразделительных аппаратов является мембранный модуль, представляющий собой пакет однотипных мембранных элементов. Объединенные в модуле мембранные элементы помещены в общий корпус аппарата, имеют общие точки ввода и вывода потоков газа. Организация потоков в модуле и типичная конструкция модуля показаны на рис. 1. Модуль работает следующим образом: разделяемая смесь вводится через входное отверстие в мембранный модуль и далее проходит мембранные элементы в направлениях, указанных стрелками. В результате различной проницаемости компонентов смеси через мембрану происходит изменение ее состава. При этом часть смеси, обогащенная метаном, проникает через мембрану и отводится из модуля в коллектор. Непроникшая часть обедненной газовой смеси по метану выводится из модуля либо на следующую ступень разделения, либо собирается в коллектор.

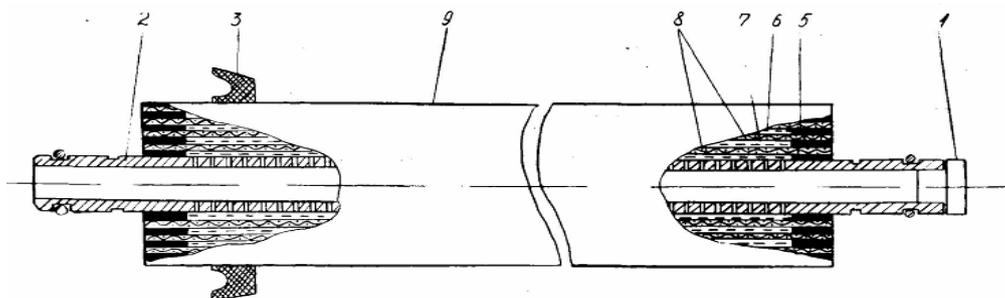
В работе на основе численного моделирования и с помощью разработанной методики расчета скорости проникновения газа через мембрану, с учетом не идеальной селективности мембраны, внешнедиффузионного кон-

вективного и внутримембранного диффузионного сопротивлений, физических свойств газовой смеси, физико-химических свойств мембраны, технологических параметров процесса, геометрии и размеров мембранного элемента [8] исследованы зависимости концентрации водорода  $C$  и скорости проникновения его через мембрану  $V$  от геометрических характеристик мембранного элемента радиуса (полуширины) напорного канала мембранного элемента  $R$ , рабочей длины мембранного элемента  $L$ , толщины мембраны  $\sigma_m$ , с целью анализа процесса выделения метана из метаносодержащих смесей в проточном газоразделительном элементе с селективно-проницаемыми мембранами.

На рис. 2 представлена схема рулонного газоразделительного элемента (РГЭ). Элемент состоит из мембраны 8, расположенной между дренажным материалом 6 и турбулизатором 7. Края мембраны загерметизированы клеевой композицией через слой дренажного материала, образуя монолитный слой 5. Мембраны, дренажный материал и турбулизатор намотаны на перфорированную трубку — коллектор, один конец которой герметично закрыт заглушкой 1. Снару-



**Рис. 1. Схема проточного мембранного газоразделительного модуля:** питающий поток — поток газовой смеси, подаваемый на вход газоразделительного модуля; пермеат — поток, содержащий проникший через мембрану в дренажный канал газ, ретентат — поток обедненного газа, выходящий из напорного канала мембранного элемента без прохождения через мембрану; мембранный модуль — коллектор, состоящий из нескольких однотипных мембранных элементов для разделения потоков питания на поток пермеата и ретентата,  $R$  — радиус (полуширина) канала,  $m$ ;  $g$ ,  $x$  — поперечная и продольные координаты,  $m$



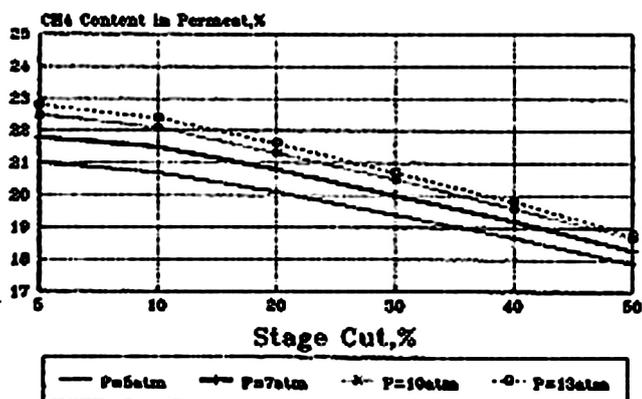
**Рис. 2. Схема рулонного газоразделительного элемента**

жи рулонный модуль обернут клейкой поливинилхлоридной пленкой 9. Исходная газовая смесь подается в напорные каналы РГЭ, которые оформляются с помощью турбулизатора.

Легкопроникающие компоненты диффундируют через мембрану, далее по каналам дренажа двигаются по спирали и поступают в полую центральную трубку. Уплотнительное резиновое кольцо 4 позволяет герметизировать рулонный элемент в корпусе аппарата. Эластичная манжета 3, укрепленная на элементе, закрывает зазор между элементом и стенками корпуса и направляет весь поток исходной газовой смеси в напорные каналы.

В соответствии с требованиями эффективности и безопасности промышленного использования некондиционных концентраций метана, содержащихся в выбрасываемых шахтными системами метановоздушных смесях, мембранный блок установки по извлечению и обогащению метана должен обеспечивать увеличение его концентрации в смеси с 10—15 % до 25—30 и более %. Из приведенных выше данных видно, что стандартные кремнийорганические полимерные мембраны («лестосил», «карбосил») обладают невысокой селективностью по паре  $CH_4/N_2$  и  $CH_4/воздух$ . Поэтому для изготовления рулонных модулей нами принят модифициро-

### Разделение CH<sub>4</sub>-воздух Стандартный Лестосил



### Разделение CH<sub>4</sub>-воздух Модифицированный Лестосил

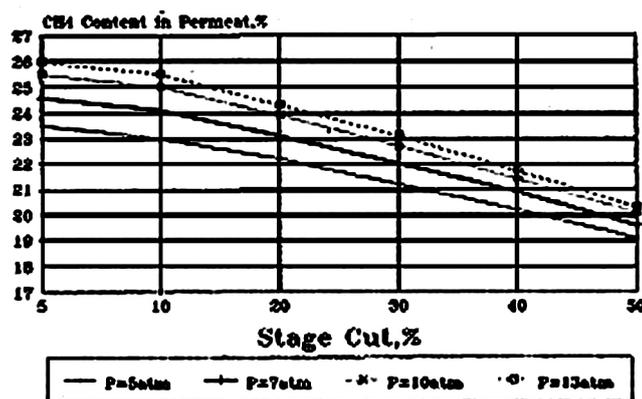


Рис. 3. Зависимость концентраций в проникшем потоке для стандартного «лестосила» и модифицированного «лестосила» от  $\theta$

ванный «лестосил», который при уменьшенной производительности обладает большей по сравнению со стандартным селективностью (более чем на 20 %). Результаты расчета показывают, что при одинаковых  $\theta$  — степени отбора — степень обогащения увеличивается в среднем на 10 %, при практически одинаковой степени извлечения.

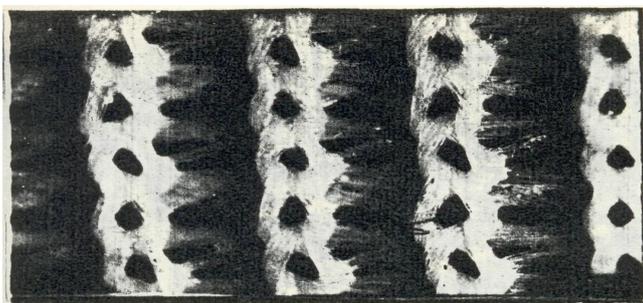
На рис. 3 представлены графики зависимости концентрации в проник-

шем потоке пермеата для стандартного «лестосила» и модифицированного «лестосила» от  $\theta$  для исходного потока для различных степеней компримирования.

Из приведенных выше данных хорошо видно, что концентрирование метана выше 23—25 % можно реально проводить с использованием модифицированного «лестосила», стандартного компрессора  $P_{сжатия} = 6$  атм. и при  $\theta$  в пределах 10—20 % со степенью извлечения метана до 30 %.

Как отмечалось выше, в технологии спирального модуля помимо газоразделительных мембран используются вспомогательные материалы для оформления коллектора, герметизирующего слоя и т.д. Основные требования к вспомогательным материалам следующие: способствовать наиболее полной реализации массообменных свойств газоразделительной мембраны; устойчивость к воздействию разделяемой газовой среды; дешёвизна; не токсичность; дополнительные требования, предъявляемые к каждому конкретному конструкционному материалу.

Например, коллектор являющийся структурным центром модуля, должен обладать достаточной жесткостью, дренажный материал — устойчивостью к сжимающим нагрузкам и, в тоже время, достаточной гибкостью, необходимой в процессе намотки рулонного модуля.



**Рис. 4. Дренажный материал**

В процессе разработки конструкции и технологии РГЭ использовалась неразъемная виниловая трубка с наружным диаметром стенки 5 мм по ТУ 6-19-051-579-86.

Турбулизатор служит для формирования, так называемого, напорного канала рулонного модуля, который образован 2-мя газодиффузионными мембранами и собственно турбулизатором, размещенным между ними. Зарубежные фирмы, изготовители спиральных модулей, в качестве турбулизатора обычно используют безузелковые сетки «VEXAR» или его аналоги. Поскольку производство в России безузелковых сеток малых толщин (0,2-0,5мм) отсутствует, при разработке отечественных РГЭ в качестве материала турбулизатора было предложено использовать ткань для сит из полиамидных моноплетей по ТУ 17-62-10838-84.

Дренаж служит для формирования канала низкого давления, по которому осуществляется отвод пермеата в коллектор, в технологии рулонных газодиффузионных элементов в качестве дренажного материала используется основовязальное трикотажное полотно типа ПТО-3, В-14 по ТУ 17-09-168-85. Одна из поверхностей полотна гладкая, другая имеет чередующиеся столбики и каналы. Для

повышения жесткости и формоустойчивости полотно пропитано отверждающейся меламиноформальдегидной смолой. На рис.4 дано увеличенное изображение дренажного материала, используемого для изготовления спиральных модулей.

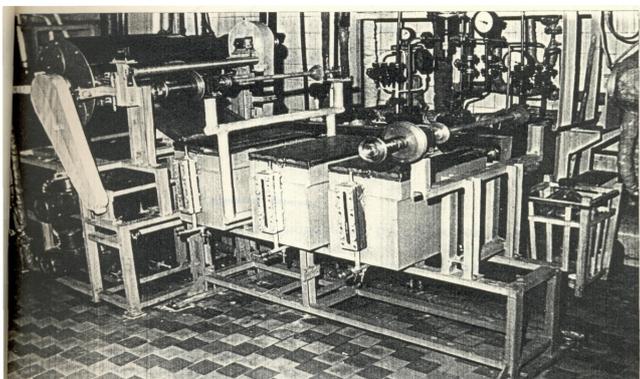
В качестве герметика в данной разработке использовался полиуретановый 2-х компонентный компаунд холодного отверждения ВИЛАД-8П по ТУ 6 05-1976-84, который обладает хорошей адгезионной способностью к конструкционным материалам и мембране, нетоксичен в отвержденном состоянии, дешев, технологичен.

В процессе изготовления рулонных газодиффузионных элементов можно выделить следующие этапы: подготовка конструкционных материалов; подготовка мембраны и изготовление мембранных пакетов; намотка рулонных элементов; оформление рулонного модуля; испытание рулонного модуля на герметичность.

Основными стадиями технологии являются намотка и испытание спиральных модулей.

Намотка спиральных модулей осуществляется на рулонной машине, представленной на рис. 5, основные стадии технологии намотки модулей следующие: приварка дренажа; укладка мембранных пакетов; герметизация; собственно смотка рулонного элемента.

Испытание рулонного модуля на герметичность проводилось на стенде, схема которого дана на рис. 6. Суть метода в следующем: модуль устанавливается в напорный корпус, который герметично закрывается



**Рис. 5. Машина для намотки рулонных элементов**

крышками и подключается к коммуникациям стенда. Затем при фиксированном перепаде давления в корпус поочередно подаются газы, имеющие различную проницаемость, при этом измеряется расход, и по их отношению судят о герметичности модуля и его селективности.

По кратко описанной выше технологии изготовления рулонных модулей собрано несколько экспериментальных образцов рулонных модулей 0,45 мм с разной полезной площадью

мембраны. Площадь мембраны первого рулонного модуля  $S=0,4 \text{ м}^2$ , площадь второго модуля  $0,7 \text{ м}^2$ .

Затем после формирования рулонного элемента модули были испытаны по «тупиковому варианту», их производительность составила:

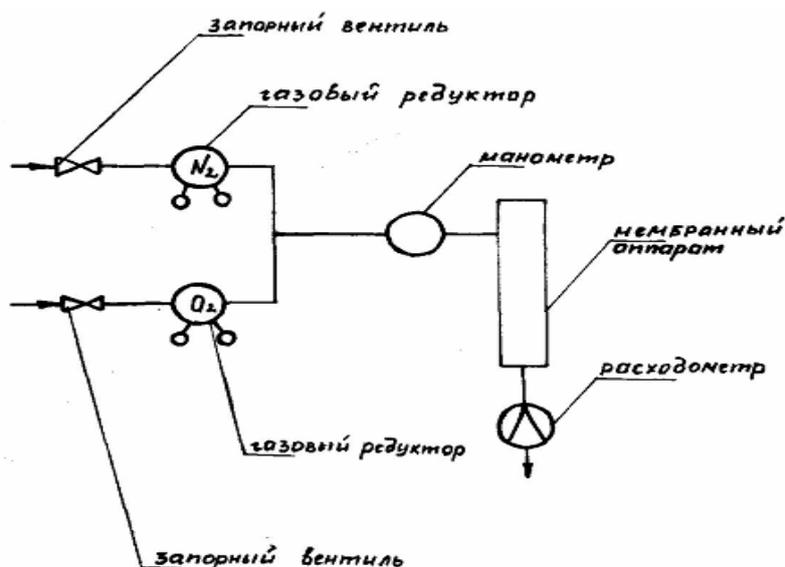
- для РГЭ №1  $\approx 15$  л/ч·ат по  $N_2$  и  $\approx 35$  л/ч·ат по  $O_2$
- для РГЭ №2  $\approx 25$  л/ч·ат по  $N_2$  и  $\approx 60$  л/ч·ат по  $O_2$

по  $O_2$

С такими параметрами спиральные модули были установлены в аппараты, спрессованы и переданы для испытаний на промышленных установках.

Предварительно был произведен контрольный расчет ожидаемых результатов испытания.

Прогнозируемые результаты испытаний на стенде спиральных модулей с использованием реальных смесей приведены в табл. 1.



**Рис. 6. Схема стенда для испытаний рулонных элементов**

Таблица 2

**Транспортные и разделительные характеристики мембраны при испытании на индивидуальных компонентах**

Полимер диффузионного слоя	Производительность, л/(м <sup>2</sup> ч атм)			Селективность	
	воздух	кислород	метан	кислород азот	метан воздух
Модифицированный лестоцил	74	143	200	2,6	2,7
	83	171	196	2,1	2,4

Таблица 3

**Испытание модифицированной мембраны при разделении смеси воздуха с метаном**

Полимер диффузионного слоя мембраны	Концентрация метана в исходной смеси, % объем	Давление исходной смеси, атм	Концентрация метана в пермеате, % объем.
Модифицированный лестоцил	5	2,0	9
	9–10	2,0	11–12
	5–6	3,0	11–12
	9–10	3,0	15–16
	10–11	4,0	17–19
	13–14	4,0	23–24

Как было показано выше, при использовании схемы компримирования при давлении 4–6 атм и концентрации метана 10–15 % для получения метановоздушной смеси с концентрацией 23–25 % и более, степень отбора должна составлять не более 20 %. При испытании спиральных аппаратов, ожидаемая производительность должна составить не более 100–150 л/ч·атм для РГЭ №1 и 220–300 л/ч·атм для РГЭ №2. Из-за неизбежных потерь давления в напорном и дренажном каналах производительность модулей может оказаться ниже на 10–15 %. Определяемые расчетным путем потери давления в напорном канале 1-го модуля должны составить не более 0,2 атм при  $\theta \approx 20$  %, для 2-го модуля — не более 0,5 атм при том же коэффициенте деления потоков.

Результаты расчетов для смеси, содержащей 13 % метана, 17 % кислорода, 70 % азота, давление исходной смеси 7 атм, коэффициент деления потоков 20 % (табл. 1).

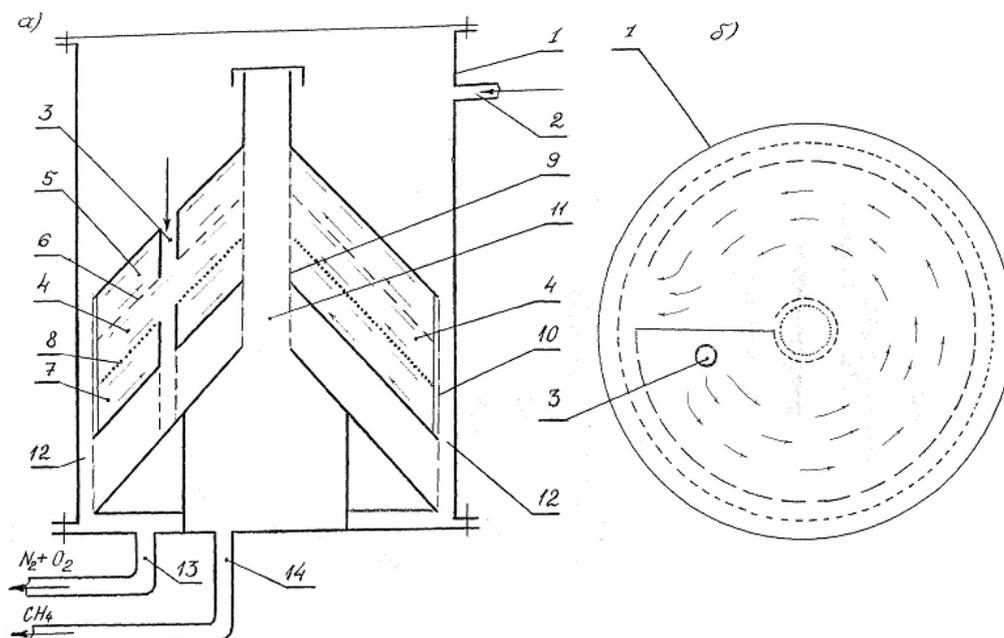
Степень извлечения метана в обоих случаях прогнозировалась около 30 %.

Фактические результаты испытаний модифицированной мембраны для разделения метановоздушной смеси (МВС) дали результаты, которые приведены в табл. 2.

Как видно из представленных результатов, полученная мембрана пригодна для разделения метановоздушных смесей.

На основе разработки и испытаний различных типов мембранных и центробежно-сепарационных газоразделительных установок установлено, что при мембранном разделении газов не удается достигнуть высокого значения коэффициента использования целевого компонента вследствие запорного слоя, образуемого компонентом, не пропускаемым мембраной. Кроме того, мембранные установки требуют для работы достаточно высокого давления, что повышает коэффициент затрат.

Центробежно-сепарационная установка, как показал эксперимент, требует для обеспечения эффективив-



**Рис. 7. Центробежно-мембранная газоразделительная установка**

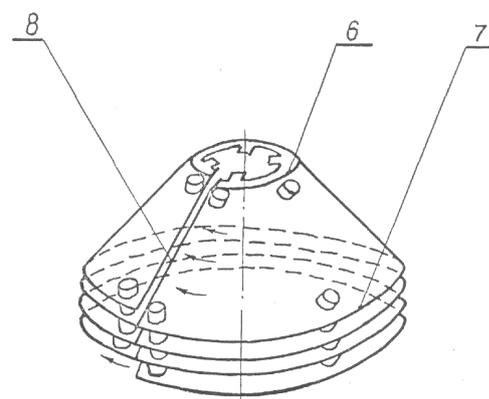
ного режима значительно меньшего давления, для получения высокой концентрации используемого компонента, тем не менее, необходимо несколько последовательных стадий обогащения.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что для повышения эффективности разделения газов необходимо совместить центробежный и мембранный принципы работы.

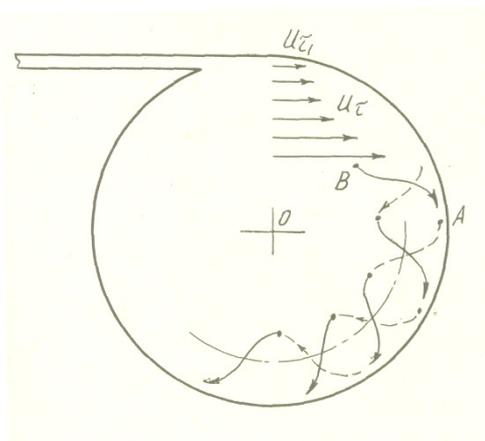
*Конструктивная схема центробежно-мембранной газоразделительной установки.*

Газоразделительный модуль размещается в цилиндрическом корпусе 1 (рис. 7), в который исходная смесь подается по каналу 2. Исполнительный узел газоразделительного модуля состоит из конически-спиральных пластин, образующих рабочие каналы. Пакет пластин разделен на секции по три щелевых канала в каждой секции. Исходная смесь подводится к

секции по вертикальному коллектору 3, подающему смесь к среднему щелевому каналу 4 каждой секции. Средний канал с верхней стороны отделен от верхнего канала 5 спирально-конической плоской конструкцией б, представляющей собой сетчатый каркас, к которому крепится мембрана, пропускающая компонент с большей



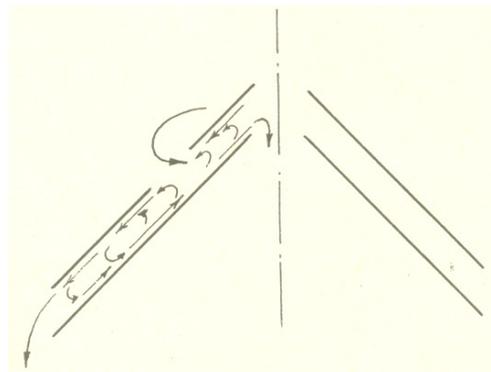
**Рис. 7, а. Конструктивная схема пакета тарелок**



**Рис. 7, б. Схема, поясняющая образование «вихревого шнура»**

плотностью, модуль состоит из конически-спиральных пластин, образующих рабочие каналы.

Средний канал с верхней стороны отделен от верхнего в осевой зоне вдоль нижней поверхности. Одновременно происходит проникание сквозь мембрану соответствующего компонента. Первичное разделение в среднем канале и дополнительное обогащение содержания соответствующего компонента в верхнем и нижнем каналах обеспечивает высокую степень разделения и повышенный коэффициент использования полезного компонента.



**Рис. 8. «Растягивание» вихревого шнура в шелевидном канале, образованном конусами**

Вертикальные контуры 9 и 10 исполнительного модуля также образованы соответствующими мембранами: внутренний 9 — пропускающий легкий компонент, а внешний 10 — тяжелый компонент.

Исходная смесь совершает один или несколько оборотов по спирально-коническим каналам (рис. 7, б), после чего еще раз обогащается с помощью мембран и по сборным каналам 11 и 12 подается к выпускным патрубкам 13 и 14.

Параметры конструктивных звеньев модуля рассчитываются по методике, разработанной для газового сепаратора.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Соловьев С-А., Поляков А. М. Перспективы применения процессов мембранного газоразделения для подготовки и переработки природного и попутного газов (Ч. 2)11 Крит, технол. Мембраны. 2006. № 32. С. 3—18.

2 Baikov V. I., Primak N. V. Membrane Selective Separation of Binary Gas Mixtures// J. of Engineering Physics and Thermophysics.. 2007. V. 80. No 2. P. 382—387.

3 Дыгнерский Ю. И., Брыков В. ТТ., КаграмановТТТ Мембранное разделение газов. — М.: Химия, 1991. **ИЛАС**

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Ельчанинов Евгений Александрович – профессор, доктор технических наук,  
Удалова Наталья Петровна — старший преподаватель,  
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru.