

УДК 66.081.3

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СТЕПЕНИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА КАПИТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ МЕМБРАННЫХ УСТАНОВОК

© 2024 г. В. И. Соломахин

ООО “ЭйПиАй-Технологжи”, 117246, Москва, Научный проезд, д. 17, подъезд 1, офис 14-4

e-mail: svi@api-tech.ru, 5174594@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.2024

После доработки 23.10.2024

Принята к публикации 28.10.2024

Рассмотрены последствия повышенных требований к степени извлечения гелия из гелийсодержащего природного газа на эффективность работы двухступенчатых мембранных установок на примере газа, близкого по составу к Ковыктинскому месторождению. При увеличении степени извлечения гелия $\geq 95\%$, наблюдается несоразмерный рост капитальных и эксплуатационных затрат. При этом ощутимо растут потери метана в составе “гелиевого концентрата”. Дополнительно, показана зависимость соотношения перепада давления в газоразделительных мембранах на эффективность работы мембранной установки, которая так же влияет на капитальные и эксплуатационные затраты. При малом влиянии нелинейных эффектов рекомендовано использовать в проникших через мембраны потоках (пермеате) давление 0.11–0.15 МПа абс. Рабочее давление в напорных каналах мембранных элементов фиксировалось на уровне в 10.0 МПа абс. Применение на второй ступени мембранной установки двух последовательных стадий газоразделения с разным использованием двух пермеатных потоков является более эффективным технологическим решением по основным характеристикам, чем с одностадийным мембранным блоком.

Ключевые слова: мембранное газоразделение, гелийсодержащий природный газ, двухступенчатые мембранные установки, извлечение гелия, установка подготовки газа, многоступенчатая компрессорная станция, потери метана

DOI: 10.31857/S2218117224050089, EDN: MXKUAY

ВВЕДЕНИЕ

Единственным промышленным источником получения гелия являются месторождения гелийсодержащего природного газа (ГПГ). Основная составляющая баланса гелия в природных газах представлена в разных источниках, например в [1]. Там же делается прогноз о том, что наибольший интерес по рентабельности получения товарного гелия в России до 2030 года в большинстве случаев будут месторождения ГПГ с исходной концентрацией гелия $\geq 0.15\%$ об. По российской терминологии (ГОСТ Р 53521-2009): “гелийсодержащий природный газ: Природный газ, концентрация гелия в котором превышает 0.05 % об.”.

Однако это будет справедливо для тех случаев, где отсутствует промышленное производство СПГ. Например, на заводах СПГ в Алжире и Катаре

достаточно малая исходная концентрация гелия в компонентном составе природного газа ($\approx 0.04\%$). Но гелий вместе с азотом и малой долей водорода остается в газовой фазе как ценное и предварительно сконцентрированное сырье (азотно-гелиевый концентрат появляется как побочный, но полезный промежуточный продукт) для дальнейшей переработки.

В отсутствие промышленного производства СПГ в регионах добычи Восточной Сибири достаточно процесса подготовки ГПГ к транспорту по ТУ СТО Газпром 089-2010 для его транспортировки по магистральному газопроводу (МГ) с целью более глубокой переработки на Амурском газохимическом комплексе (ГХК), включая получение товарного гелия заданной чистоты в объемах, востребованных рынком. Потенциал по количеству гелия в составе ГПГ, поставляемого по

МГ “Сила Сибири”, является избыточным и его необходимо регулировать в зависимости от потребностей внешнего и внутреннего рынков, а так же от готовности и технической оснащенности Амурского ГХК производить требуемые объемы товарного гелия заданной чистоты. Некоторые вопросы данной задачи частично обсуждались, например, в работах [2, 3].

В рассматриваемом материале как раз анализируется эффективность некоторых решений в задаче извлечения и концентрирования избыточных объемов гелия с помощью сравнения нескольких схемных решений на базе технологии мембранного газоразделения и обоснованности выбора параметров эксплуатации применяемых мембранных элементов (МЭ), включая рассмотрение последствий от завышенных требований по степени извлечения целевого газа. Принципам мембранного газоразделения посвящено достаточно много книг, например [4, 5], а также большой объем научно-технических публикаций.

Двухступенчатая установка мембранного выделения гелиевого концентрата (УМВГК) Чаяндинского НГКМ в промышленном исполнении была внедрена с применением разных производителей МЭ и с наиболее простой технологической архитектурой. УМВГК применяется только для части подготовленного ГПГ (на байпасном отводе). Выбор в качестве технологического решения процессов газоразделения на базе мембранных технологий для ГПГ известен достаточно давно. Наибольшее внимание и развитие этих технологий было в США, что вероятно мотивировалось государственной поддержкой на основе закона “О гелии”. Так Конгрессом США в 1960 году были внесены существенные поправки в данный закон, который действовал с 1925 года. В результате появилось подземное хранилище для азотно-гелиевого концентрата на базе ранее выработанного гелийсодержащего месторождения в Клиффсайде с достаточно плотным и протяженным базальтовым куполом, что давало относительную герметичность подземного хранилища.

Из большого числа обоснованных технологических решений, где на первом этапе применяется мембранная установка по извлечению и концентрированию гелия из подготовленного ГПГ, а на втором этапе – последующая адсорбционно-криогенная переработка гелиевого концентрата приведем только один пример [6]. Целью является иллюстрация даты на примере патента США (заявлено в декабре 1964 года), чтобы показать давно известную и обоснованную комбинацию этих технологий.

Для ГПГ Чаяндинского НГКМ (возможно также и для ГПГ Ковыктинского ГКМ) последующая адсорбционно-криогенная переработка гелиевого

концентрата не требуется, так как гелиевый концентрат закачивается обратно в недра этих месторождений в отдельно выбранные скважины. Данное решение на перспективу может сохранить в месторождениях часть ценного инертного газа в своем компонентном составе. В таком подходе на первый план выходит задача по минимизации затрат, как капитальных, так и эксплуатационных при сравнении разных технологических решений в классе двухступенчатых конфигураций мембранных установок, обоснованности требований по степени извлечения гелия и оптимизации выбора важных параметров эксплуатации самих МЭ с учетом их свойств.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ СПЕЦИФИКА

Целью является определение оптимальной степени извлечения гелия с учетом исходного состава ГПГ и его параметров. Подобным критерием может быть начало нелинейного роста капитальных вложений и энергозатрат при повышении с каждым дополнительным процентом требования по степени извлечения гелия (например, более 90%). Это более общая постановка задачи при разных концентрациях гелия в процессе оптимизации мембранной установки с требуемыми свойствами самих мембран.

Из класса двухступенчатых мембранных установок с одностадийным блоком мембранного газоразделения на первой ступени будем анализировать наиболее эффективный вариант из [7], принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Одностадийный мембранный блок (МБ) состоит из необходимого количества параллельно работающих МЭ с целью обеспечения заданной степени извлечения гелия, который формируется в составе проникшей через мембраны газовой смеси (в пермеате). В работе [7] сравнивались варианты двухступенчатых схем с одинаковыми требованиями по допустимой остаточной концентрации гелия в ретентате, поэтому выводы в данной статье будут дополнительными к рекомендациям уже сделанным в указанном источнике.

Для двухступенчатых мембранных установок характерно следующее:

- при извлечении гелия из основного потока ГПГ используется первая ступень и поэтому она наиболее капиталоемкая в составе всей мембранной установки в части мембранного оборудования и формирования основной энергетической нагрузки для межступенчатой компрессорной станции КС-1;

- при последующем концентрировании гелия из проникшего потока газа первой ступени с заданной степенью его извлечения используется уже вторая ступень.

Как правило, на первой ступени мембранной установки в большинстве случаев достаточно одностадийного мембранного газоразделения, поскольку:

— исходная концентрация гелия в ГПГ для ряда российских гелийсодержащих месторождений находится в диапазоне 0.10–0.60% моль;

— для полимерных полуволоконных мембран с асимметричной структурой доступен фактор разделения (селективность) по паре газов He/CH_4 на уровнях 80–120 и при высоких коэффициентах проницаемости самого гелия, например, представленные в [5] для мембранной продукции Ube.

Селективность по паре газов He/CH_4 ($\alpha_{\text{He}/\text{CH}_4}$) это отношение коэффициента проницаемости гелия к аналогичному коэффициенту проницаемости метана при одинаковых рабочих параметрах эксплуатации МЭ и в составе той же газовой смеси.

Под степенью извлечения (R —Recovery) целевой газовой компоненты при газоразделении для одностадийного мембранного блока понимается:

$$R = (C_p * Q_p) / (C_f * Q_f), \quad (1)$$

где C_p — концентрация компоненты в пермеатном потоке, % моль; Q_p — расход пермеата, приведенный к атмосферному давлению, $\text{нм}^3/\text{ч}$;

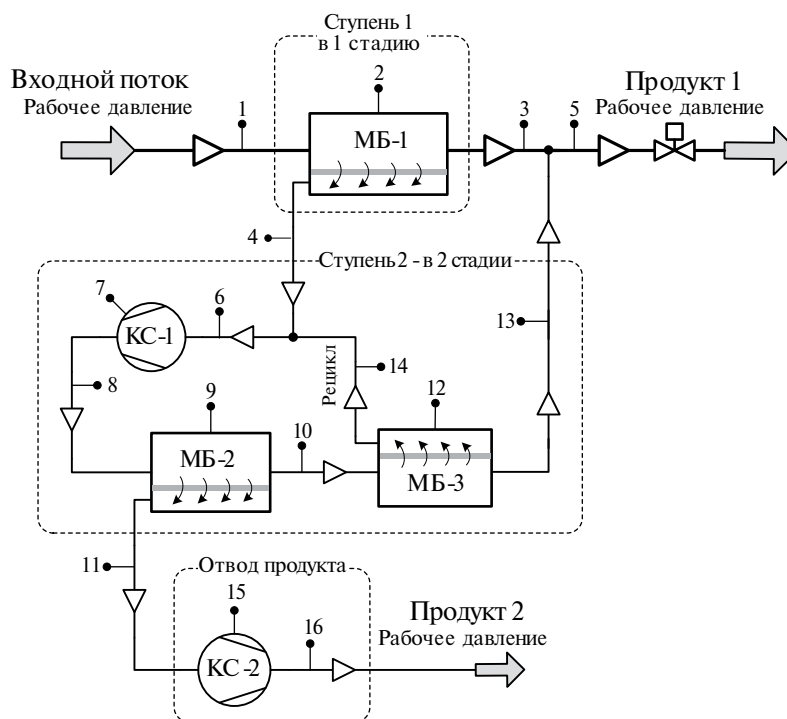


Рис. 1. Принципиальная двухступенчатая схема мембранного извлечения гелия и его концентрирования в соответствии с российским патентом [8], где 1 — трубопровод для подачи ГПГ при рабочем давлении, удовлетворяющий ТУ СТО Газпром 089-2010 и, прошедший тщательную фильтрацию от механических примесей; 2 — одностадийный мембранный блок МБ-1 из параллельно работающих МЭ; 3 — трубопровод отвода ретентата от МБ-1 с малым остаточным содержанием гелия; 4 — трубопровод пермеата низкого давления от МБ-1 с извлеченными газами; 5 — трубопровод для отвода объединенных двух газовых потоков (3 и 13) при рабочем давлении (от первой и второй ступеней) и с малым остаточным содержанием гелия как один из конечных результатов мембранного газоразделения — Продукт 1; 6 — трубопровод подачи газа на вход КС-1, после объединения двух пермеатных потоков низкого давления от МБ-1 и от МБ-3 с целью их сжатия до рабочего давления; 7 — многоступенчатая компрессорная станция КС-1 со вспомогательным оборудованием; 8 — трубопровод отвода сжатого потока газа из КС-1 для последующего газоразделения; 9 — одностадийный мембранный блок МБ-2 для реализации первой стадии газоразделения на второй ступени мембранной установки; 10 — трубопровод отвода ретентата от МБ-2 и его подачи в МБ-3 для последующей стадии газоразделения в составе второй ступени; 11 — трубопровод отвода пермеата от МБ-2 для формирования Продукта 2, который можно условно назвать “гелиевым концентратом”; 12 — одностадийный мембранный блок МБ-3 для реализации финальной стадии газоразделения для достижения требуемых итоговых результатов от второй ступени; 13 — трубопровод отвода ретентата от МБ-3 с малым остаточным содержанием гелия с его концентрацией, как и в ретентате от МБ-1 для объединения этих двух потоков; 14 — трубопровод отвода циркулирующего пермеата низкого давления от МБ-3 для последующей подачи совместно с пермеатом от МБ-1 на вход КС-1; 15 — многоступенчатая компрессорная станция КС-2 с целью восстановления начального рабочего давления у пермеатного потока от МБ-2 для корректной оценки суммарной удельной энергоёмкости всех процессов в двухступенчатой мембранной установке; 16 — трубопровод отвода гелиевого концентрата с рабочим давлением, как второго конечного продукта — Продукт 2 для принятия решения по его дальнейшему использованию.

C_f – концентрация компоненты во входном потоке ГПГ, % моль; Q_f – расход входного потока, приведенный к атмосферному давлению, $nm^3/ч$.

Другим важным параметром для одностадийного мембранного блока является величина коэффициента деления потока θ при обеспечении требуемой степени извлечения целевого газа. Он определяется как соотношение величины расхода пермеата к величине входного потока (расходы при атмосферном давлении):

$$\theta = Q_p / Q_f. \tag{2}$$

Важность этого параметра заключается в том, что он определяет основной вклад в затраты по капитальным вложениям для компрессоров и на величину их мощности с учетом соотношения давлений (над- и под мембранным пространствам).

Вопрос повышенного требования к степени извлечения гелия, особенно на первой ступени мембранного газоразделения для одностадийного мембранного блока, не должен оставаться без анализа возможных негативных последствий. Малое увеличение требования по величине R_{He} , например, в диапазонах 85%–99% может оказать нелинейный рост требуемых капитальных и эксплуатационных затрат. Первой ступени достается основная нагрузка по входному потоку ГПГ да еще с не высокой концентрацией гелия. Вторая ступень по концентрированию извлеченного гелия будет уже работать с потоком в $\approx 20 \pm 5$ раз меньшим по его расходу и с повышенной входной концентрацией извлеченного

гелия. Кроме быстрых газовых компонент (БГК) таких как гелий, водород, пары воды, CO_2 , в пермеат МБ-1 будут попадать в относительно меньшей степени медленные газовые компоненты (МГК), например, азот, метан, этан и т.д. Однако высокая исходная концентрация метана в составе ГПГ будет оказывать еще свое влияние на доминирование в компонентном составе пермеатного потока, выходящего из МБ-1 по трубопроводу 4.

Для численного моделирования мембранного газоразделения в качестве примера взят прототип мембран со следующими значениями селективности к метану:

$$\begin{aligned} \alpha_{He/CH_4} &= 90; \alpha_{H_2/CH_4} = 80; \alpha_{CO_2/CH_4} = \\ &= 25; \alpha_{N_2/CH_4} = 1.25; \\ \alpha_{C_2H_6/CH_4} &= 0.5; \alpha_{C_3H_8/CH_4} = 0.25; \alpha_{C_{4+}/CH_4} = 0.12. \end{aligned}$$

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННЫХ
ТРЕБОВАНИЙ К СТЕПЕНИ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕЛИЯ

При дальнейшем анализе выберем ГПГ с компонентным составом, близким к группе Ковыктинских месторождений. В составе ГПГ, подготовленного по ТУ СТО Газпром 089-2010, включая тщательную фильтрацию от механических примесей, на входе в МБ-1, концентрация гелия для проведения численного моделирования выбрана $\approx 0.28\%$ моль. Компонентный состав входного потока для моделирования представлен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты численных расчетов газоразделения ГПГ на первой ступени в МБ-1 при трех требованиях к степени извлечения гелия (85%, 90% и 98%)

Номера потоков	Входной поток 1	Поток 3 (Ретентат)	Поток 4 (Пермеат)	Поток 3 (Ретентат)	Поток 4 (Пермеат)	Поток 3 (Ретентат)	Поток 4 (Пермеат)
Давление, МПа абс.	10.0	10.0	0.15	10.0	0.15	10.0	0.15
Расходы потоков	100.0%	96.12%	3.88%	95.48%	4.52%	93.23%	6.77%
Компонентные составы, % моль							
Метан	91.34	91.490	87.621	91.486	88.254	91.437	89.999
Этан	4.85	4.950	2.366	4.967	2.387	5.024	2.450
Пропан	1.10	1.133	0.270	1.139	0.273	1.159	0.281
Бутаны ⁺	0.72	0.746	0.087	0.750	0.086	0.766	0.089
Гелий	0.28	0.044	6.133	0.029	5.576	0.006	4.053
Водород	0.05	0.009	1.061	0.006	0.972	0.002	0.718
Азот	1.62	1.608	1.926	1.605	1.939	1.595	1.970
CO ₂	0.04	0.020	0.536	0.018	0.513	0.011	0.440
Степень извлечения гелия		85.0%		90.0%		98.0%	
Степень извлечения метана		3.72%		4.37%		6.67%	

Численное моделирование проводилось без учета нелинейных эффектов в режиме идеального вытеснения при организации противоточной конфигурации движения потоков внутри МЭ. Математическая модель расчетов аналогична методике, представленной в [9]. Задавалось три варианта по степени извлечения гелия: 85%, 90% и 98%.

Из сравнения результатов расчетов следует, что при стремлении обеспечить более высокую степень извлечения гелия в диапазоне 85%–98%:

- концентрация извлеченного гелия в пермеате от МБ-1 (поток 4), тем не менее, снижается за счет увеличения доли проникших МГК (в основном – метана);

- величина потока 4 возрастает на 74.4% при повышении степени извлечения гелия с 85% до 98% по тем же причинам, что однозначно негативно скажется на капитальных вложениях в компрессор КС-1, а также потребует ощутимо повысить его мощность, и это только из-за вклада увеличения расхода пермеата от МБ-1;

- остается еще открытым вопрос по необходимости повышения капитальных вложений для

МБ-1 (по количеству МЭ) при требовании повысить степень извлечения гелия более 90%, например, переходя в диапазон 95%–99%.

Более детальный анализ по результатам численного моделирования в расчетах процессов газоразделения исходного ГПГ, параметров работы одностадийного МБ-1 и характеристик применяемых мембран, представлен на рис. 2.

Из графических зависимостей на рис. 2 однозначно следует, что основной вклад в капитальные и энергетические затраты формирует доля проникшего метана. Нелинейный рост явно проявляется при требовании степени извлечения гелия > 90%.

Основные выводы и рекомендации для рассмотренного примера с применением одностадийного МБ-1 в составе первой ступени следующие:

- ограничить требование по степени извлечения гелия уровнем до 90;
- при достаточно веском обосновании допустим диапазон требований 90–93%;
- крайне нежелательным является требование – не менее 95%.

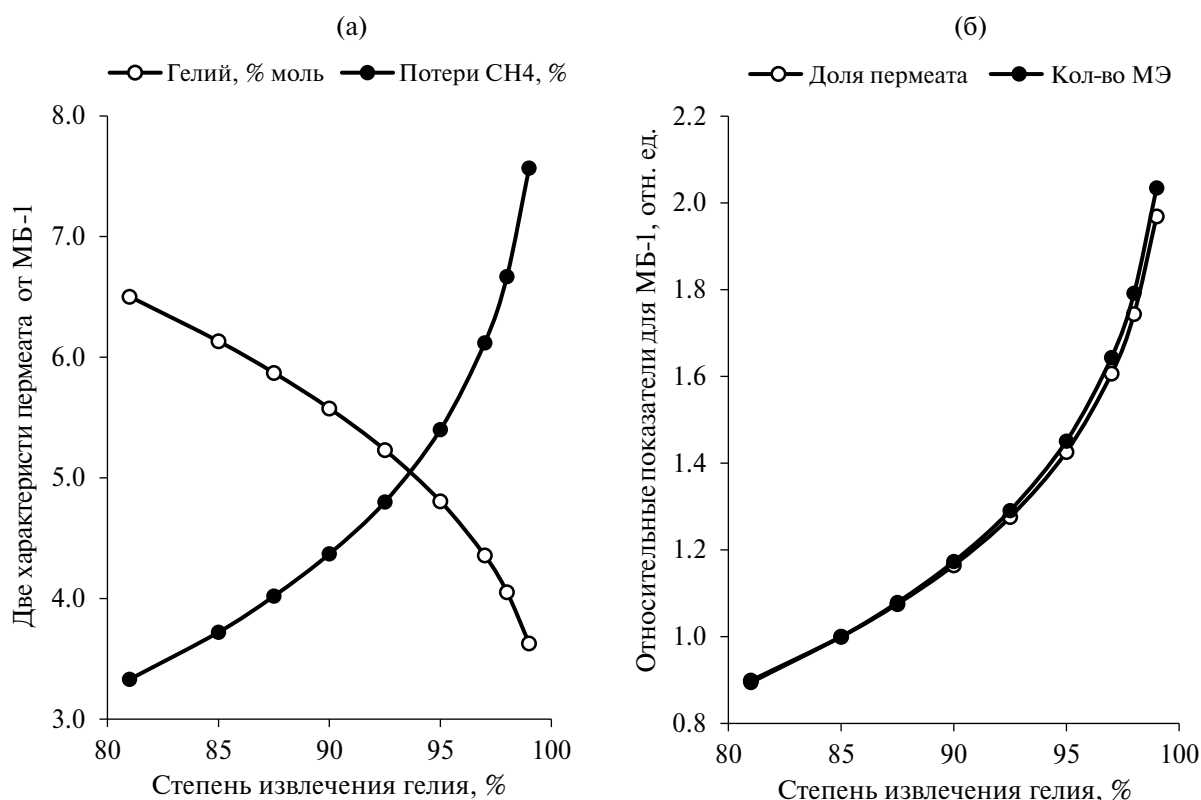


Рис. 2. Наиболее характерные зависимости последствий повышенных требований к степени извлечения гелия для МБ-1 на первой ступени установки, где а) график снижения концентрации извлеченного гелия в потоке пермеата МБ-1 за счет увеличения доли проникшего/потерянного метана при требовании увеличить степень извлечения гелия более 90% и, тем более, при требовании – более 95%; б) графики относительных показателей (нормировано на значения при 85% степени извлечения гелия) в увеличении расхода пермеата МБ-1 и в увеличении капитальных вложений по требуемому количеству МЭ.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МБ-1

В приведенном анализе использовалось рабочее давление в 10.0 МПа абс., а в области пермеата 0.15 МПа абс. Требуется учитывать не разницу в этих давлениях, а особо обратить внимание на соотношение этих давлений. При заданной степени извлечения гелия в МБ-1 на уровне 90% и фиксированном давлении в над-мембранном пространстве на уровне 10.0 МПа абс. будем менять давление в пермеате МБ-1 в диапазоне 0.11÷0.30 МПа абс. Результаты численного анализа при таких изменениях показаны на рис. 3.

Нагрузка на КС-1 по расходу пермеата увеличивается на 35% при повышении давления пермеата с 0.15 МПа абс. до 0.30 МПа абс. Дополнительно, требуемое количество МЭ в составе МБ-1 придется увеличить на 40% для обеспечения заданной степени извлечения гелия в 90%. К соотношению давлений на МЭ следует относиться особенно внимательно из-за проиллюстрированных негативных последствий. Если характеристики применяемых полимерных полволоконных мембран позволяют

стабильно работать на перепаде давлений в 10.0 МПа при 30–50°C, то целесообразнее в пермеатной области оставаться при давлениях 0.11–0.15 МПа абс. Увеличение требуемого коэффициента компримирования пермеата низкого давления будет с запасом компенсироваться снижением расхода пермеата на входе в КС-1, что не приведет к увеличению его мощности.

Стоит отметить, что некоторые полимерные полволоконные мембраны не выдерживают высокие перепады давлений особенно при повышенных температурах, кроме того, при увеличении давления, газоразделительные свойства мембран могут изменяться нелинейным образом, как, например, представлено в [10]. Применяемая численная модель газоразделения, как отмечалось выше, не учитывает подобные или иные нелинейные эффекты. Однако значения селективностей могут быть взяты из экспериментального тестирования МЭ на стендовых испытаниях при планируемых параметрах их эксплуатации. Минимизация влияния нелинейных эффектов при повышенных давлениях является важной, но отдельной темой. Таким образом, сохраняя рекомендации по режиму давлений, перейдем к анализу второй ступени.

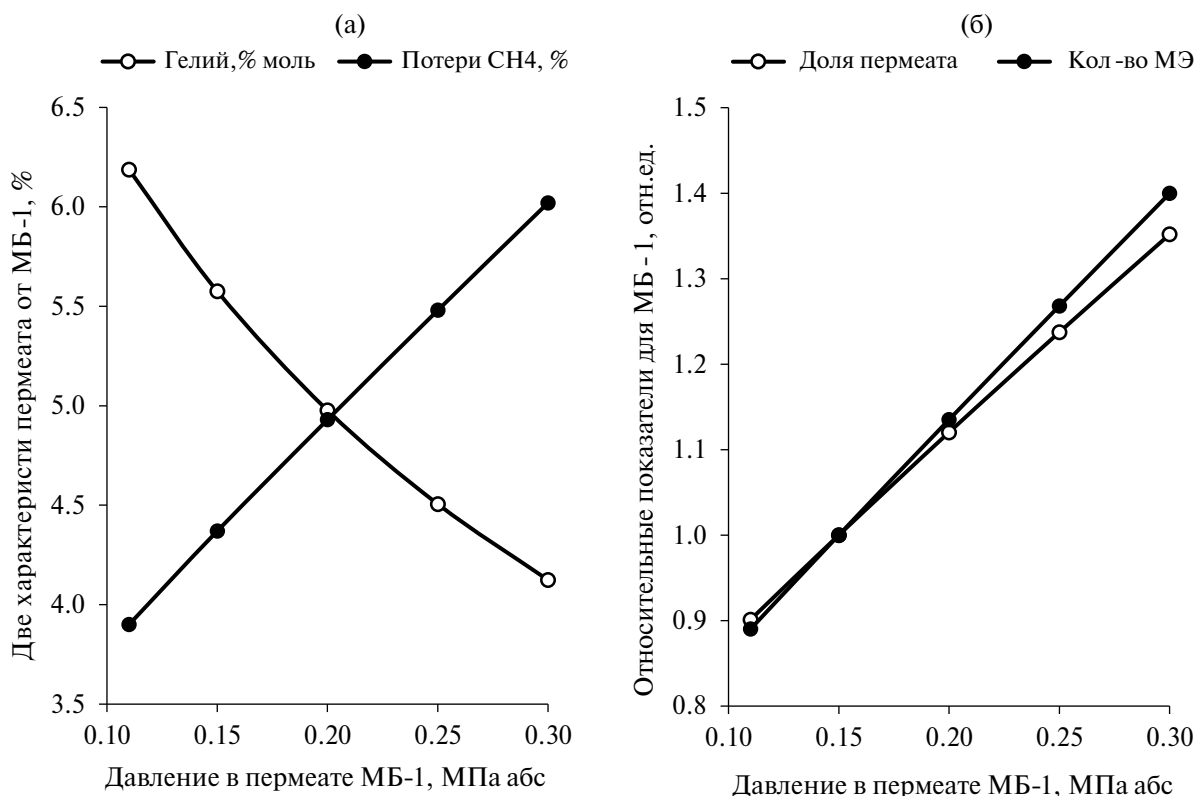


Рис. 3. Графики зависимостей от изменений соотношений давлений на МЭ в составе МБ-1 при обеспечении одинаковой степени извлечения гелия в 90%, где а) график снижения концентрации извлеченного гелия в потоке пермеата МБ-1 за счет увеличения доли проникшего/потерянного метана; б) графики относительных показателей (нормировано на значения при давлении пермеата 0.15 МПа абс.) по влиянию на величину доли пермеата θ_1 и по аналогичным изменениям капитальных вложений в количество МЭ для МБ-1.

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕННОГО ГЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ ВТОРОЙ СТУПЕНИ

Для второй ступени будут совсем иные начальные условия по расходу и компонентному составу исходной газовой смеси. Кроме того, остаточная величина концентрации гелия на выходе газа второй ступени (в потоке 13) должны быть не более чем остаточная концентрация гелия на выходе первой ступени (в потоке 3), то есть $\approx 0.029\%$ моль. В процессе численной оптимизации процессов газоразделения на второй ступени могут быть определены коэффициенты деления потоков для МБ-2 и МБ-3 как θ_2 и θ_3 соответственно. Суммарный коэффициент деления потока θ_{2+3} для второй ступени из двух стадий (МБ-2 + МБ-3) определяется алгебраическим выражением:

$$\theta_{2+3} = Q_{11} / Q_4 = \theta_2 / (1 - \theta_3(1 - \theta_2)). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при стремлении к нулю значения θ_3 , физически это означает ликвидацию второй стадии (МБ-3), происходит вырождение второй ступени в одностадийную конфигурацию — как частный случай, который показан на рис. 4. Такой “усеченный” вариант исполнения второй ступени в виде одностадийного

мембранного блока известен и он соответствует другому российскому патенту [11].

Данное технологическое схемное решение даже реализовано в крупнотоннажном промышленном исполнении. Снижение эффективности такого решения состоит в том, что придется примерно в 150–200 раз снизить концентрацию гелия в одну стадию на МБ-2*. Остаточная концентрации гелия в потоке ретентата МБ-2* (трубопровод 24) не должна превышать 0.029% моль для последующего объединения с потоком ретентата МБ-1 (трубопровод 3). Это потребует в МБ-2* реализовать степень извлечения гелия $\approx 99.6\%$ со всем набором ожидаемого негатива, как было показано выше на примере первой ступени.

Для численных расчетов второй ступени в две стадии из МБ-2 и МБ-3, как основного варианта схемного решения, представленного на рис. 1, используем полимерные мембраны с теми же газоразделительными свойствами. На первой ступени выбран вариант со степенью извлечения гелия с уровнем 90%, а соотношение давлений на всех МЭ принято везде одинаковым 10.0 : 0.15. Численное моделирование газоразделения всей мембранной установки проводилось аналогично первой ступени без учета нелинейных эффектов.

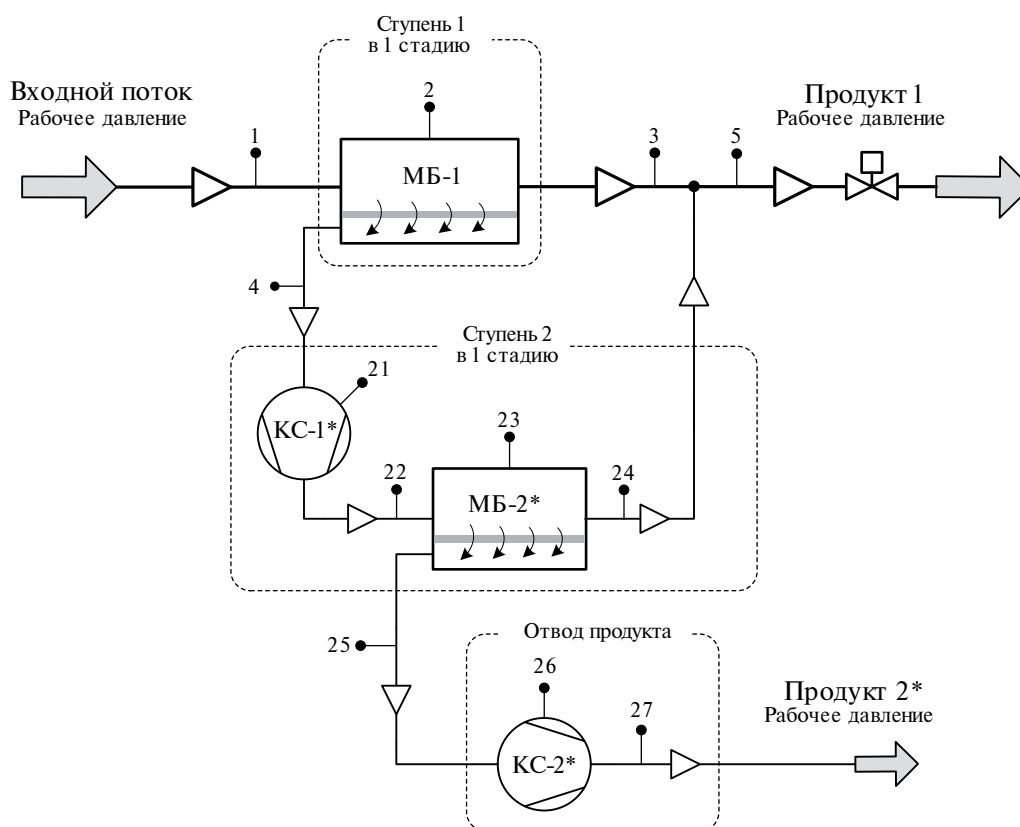


Рис. 4. Принципиальная двухступенчатая схема мембранного извлечения гелия и его концентрирования с “усеченным” исполнением второй ступени [11].

Соотношение МЭ в составах МБ-2 и МБ-3 выбрано $\approx 1 : 2$, то есть в составе МБ-3 используется в два раза больше МЭ, чем в МБ-2. Наличие МБ-3 является важным звеном для концентрирования извлеченного гелия. Результаты расчетов показаны в табл. 2.

Циркулирующий по трубопроводу 14 поток пермеата от МБ-3 добавляется к потоку пермеата от МБ-1 в режиме обогащения по гелию. Дополнительная нагрузка для КС-1 по увеличению величины расхода поступающего газа составляет $\approx 7.28\%$ относительно величины расхода пермеата МБ-1. Однако одновременно снижаем нагрузку для КС-2 из-за уменьшения величины расхода пермеатного потока от МБ-2. Суммарная нагрузка на входе для двух компрессоров по величине расходов составит:

$4.520\% + 0.329\% + 0.439\% = 5.288\%$ от величины входного потока ГПГ.

Применение двух последовательных стадий газоразделения на второй ступени, в отличие от ее “усеченного” варианта, минимизирует степень извлечения (потерь) метана до 0.133% и, тем самым, повышает концентрацию извлеченных БГК (гелия, водорода, CO_2) в составе Продукта 2. Соотношение требуемого количества МЭ в составах МБ-1/(МБ-2+МБ-3) прогнозно составляет $\approx 33/(1+2)$, то есть на второй ступени требуемое суммарное количество МЭ примерно в 11 раз меньше, чем в составе МБ-1. Отметим, что степень извлечения гелия только для МБ-3 в диапазоне $95\text{--}98\%$,

может быть обоснована, так как пермеат МБ-3 не выводится из схемы, а циркулирует внутри второй ступени. Рекомендуется формировать пермеат МБ-3 с более высокой концентрацией гелия, чем в пермеате МБ-1, создавая режим обогащения по гелию. Это уменьшает потери метана в составе гелиевого концентрата, повышая концентрацию извлеченного гелия в нем.

Расчетные показатели по эффективности работы двухступенчатой мембранной установки, представленной на рис. 1, получены:

- для выбранного компонентного состава ГПГ (аналог Ковыктинского ГПГ);
- при заданных газоразделительных свойствах мембранной продукции;
- для рекомендованной степени извлечения гелия в МБ-1 на уровне $\approx 90\%$;
- при не высоком давлении пермеатных потоков – 0.15 МПа абс.;

Для сравнения рассчитаем процесс газоразделения в “усеченной” версии двухступенчатой мембранной установки, представленной на рис. 4. Для этого:

- немного повысим требование по степени извлечения гелия с 90 до 95% ;
- аналогично, давление в пермеате поднимем с 0.15 до 0.20 МПа абс.

Суммарная нагрузка на входе для двух компрессоров по величине расходов потоков для сжатия

Таблица 2. Результаты расчетов извлечения гелия и последующего его концентрирования для двухступенчатой установки, представленной на рис. 1

Номера потоков	Входной поток 1	Поток 3	Поток 4	Продукт 1 поток 5	Поток 14 (рецикл)	Продукт 2 поток 16
Давление, МПа абс.	10.0	10.0	0.15	10.0	0.15	10.0
Расходы потоков	100.0%	95.480%	4.520%	99.561%	0.329%	0.439%
Компонентные составы, % моль						
Метан	91.34	91.486	88.254	91.620	76.795	27.705
Этан	4.85	4.967	2.387	4.870	1.049	0.366
Пропан	1.10	1.139	0.273	1.105	0.060	0.021
Бутаны +	0.72	0.750	0.086	0.723	0.010	0.003
Гелий	0.28	0.029	5.576	0.029	12.958	57.192
Водород	0.05	0.006	0.972	0.006	2.749	9.936
Азот	1.62	1.605	1.939	1.624	2.100	0.,767
CO₂	0.04	0.018	0.513	0.023	4.279	4.010
Суммарная степень извлечения гелия, %						89.576%
Суммарная степень извлечения водорода, %						87.148%
Суммарная степень извлечения/потерь метана, %						0.133%

Таблица 3. Результаты расчетов извлечения гелия для “усеченной” версии двухступенчатой установки, представленной на рис. 4

Номера потоков	Входной поток 1	Поток 3	Поток 4	Поток 24	Продукт 2* Поток 25	Продукт 1 Поток 5
Давление, МПа абс.	10,0	10,0	0,20	10,0	0,20	10,0
Расходы потоков	100.0%	93.852%	6.148%	5.263%	0.885%	99.115%
Компонентные составы, % моль						
Метан	91.34	91.447	89.694	94.753	59.636	91.623
Этан	4.85	5.008	2.444	2.713	0.839	4.886
Пропан	1.10	1.154	0.281	0.319	0.049	1.110
Бутаны +	0.72	0.761	0.089	0.104	0.008	0.726
Гелий	0.28	0.015	4.327	0.015	29.973	0.015
Водород	0.05	0.003	0.761	0.004	5.256	0.003
Азот	1.62	1.598	1.962	2.020	1.602	1.620
CO ₂	0.04	0.014	0.442	0.072	2.637	0.017
Суммарная степень извлечения гелия, %					94.753%	
Суммарная степень извлечения водорода, %					93.047%	
Суммарная степень извлечения/потерь метана, %					0.578%	

составит для “усеченного” варианта двухступенчатой схемы:

$6.148\% + 0.885\% = 7.033\%$ от величины входного потока ГПГ.

Нагрузка для компрессоров по расходам потоков увеличилась с 5.288% до 7.033%, что потребует использовать более высокие по мощности компрессорные агрегаты. При этом потери метана в составе гелиевого концентрата выросли в 4.34 раза: вместо 0.133% теряется 0.578% чистого метана от его исходного количества. Количество дополнительно теряемого метана более чем достаточно [8] для энергетических приводов двух компрессорных станций в составе всей мембранной установки. Капитальные вложения в требуемое количество МЭ для рассмотренного варианта “усеченной” схемы возрастут на $\approx 40\%$. Такие негативные последствия получены:

- при переходе на технологическую схему по “усеченному” варианту;
- при повышении требования по степени извлечения гелия с 90 до 95%;
- при увеличении давления пермеатных потоков с 0.15 до 0.20 МПа абс.

При малом содержании в магистральном ГПГ кислых газов (CO₂ и H₂S) и низкой доли газообразных углеводородов C₃₊, обычно математические модели мембранного газоразделения без учета нелинейных эффектов показывают близкие к экспериментальным показателям результаты, особенно

при сравнении разных вариантов в относительных единицах (лучше/хуже в процентах).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухступенчатая мембранная установка извлечения гелия из ГПГ по патенту РФ [8] имеет ряд преимуществ: по эффективности, ресурсосбережению, удельной энергоёмкости и капитальным вложениям, чем в варианте по патенту РФ [11], во всяком случае, по прогнозным результатам расчетов в относительных единицах.

Оптимизацию соотношения давлений следует соотносить с величиной селективности целевой газовой компоненты к метану. Для рассмотренного примера величина давления в пермеатах рекомендуется поддерживать в интервале 0.11–0.15 МПа абс. Если свойства полимерных мембран позволят снизить давление в пермеате до атмосферной величины, то положительный эффект будет еще более выраженным. Обоснованное требование по степени извлечения гелия на первой ступени мембранной установки (в одну стадию) для высокоселективных полуволоконных мембран находится на уровне $\approx 90\%$. Это значение соответствует снижению концентрации гелия в над-мембранном пространстве МЭ первой ступени примерно в 10 раз. Исключением может быть ГПГ с повышенной концентрацией гелия (0.50–0.60% моль), где при корректном обосновании, степень извлечения гелия можно выбрать в диапазоне

90–93%. В противном случае прогнозируется нелинейный рост капитальных и эксплуатационных затрат с ощутимым увеличением потерь метана в составе гелиевого концентрата.

Корректирующие поправки к результатам любых расчетов в каждом случае целесообразно делать на основе экспериментального тестирования промышленных МЭ при планируемых параметрах их эксплуатации и с учетом их ограничений по потребительским свойствам, которые заранее должны быть проанализированы. Тестирование желательно проводить при аналогичном компонентном составе ГПГ, фиксируя наличие или отсутствие степени влияния нелинейных эффектов для применяемой структуры полимеров в МЭ. Ресурсные испытания работы прототипа мини установки будут весьма полезны для анализа стабильности ее работы во время пробной эксплуатации в аналогичных условиях.

Отдельная благодарность от автора за обсуждение выводов и рекомендаций по материалам настоящей статьи: Каграманову Г.Г., профессору, д.т.н., зав. кафедрой мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якуцени В.П. Сырьевая база гелия в мире и перспективы развития гелиевой промышленности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009 (4). С.1–24.
2. Голубева И.А., Настин А.Н., Соломахин В.И., Павловский В.В. Гелий в России сегодня: проблемы и пути решения // Газовая промышленность. 2021. № 4 (815). С. 70–78.
3. Голубева И.А., Настин А.Н., Соломахин В.И., Павловский В.В. Мембранные технологии извлечения гелия из природных газов, перспективы развития Российской гелиевой промышленности // Газовая промышленность. 2021. № 5 (816). С. 20–26.
4. Дытнерский Ю.И., Брыков В.П., Каграманов Г.Г. Мембранное разделение газов. М.: Химия, 1991. С. 344
5. Richard W. Baker. Membrane technology and applications. Wiley; 3rd edition, 2012 – 590 p.
6. US Patent 3 324 626 A. Grant 1967/06/13, Priority 1964/12/03. T. Dresser and al. Process for recovery of Helium.
7. Соломахин В.И. Технологический способ оптимизации интегрального ресурсо- и энергосберегающего фактора в задаче мембранного извлечения гелия из подготовленного природного газа высокого давления // Мембраны и мембранные технологии. 2019. Т. 9. № 1. С. 38–46. DOI: 10.1134/S2218117218060081.
8. Патент № 145348 Российская Федерация, МПК B01D 63/00 (2006.01), B01D 53/22 (2006.01). Установка мембранного разделения газовой смеси высокого давления: № 2014122480/05: заявл. 04.06.2014 г.; опубл. 20.09.2014 г. / Соломахин В.И.; заявитель ДОО ЦКБН ОАО “Газпром”.
9. Лагунов Н.И., Курчатова И.М., Карасева М.Д., Соломахин В.И. Оценка эффективности применения мембранных технологий для извлечения гелия из природного газа при повышенных давлениях // Мембраны и мембранные технологии. 2014. Т. 4. №4, С. 272–279. <https://doi.org/10.1134/S2218117214040051>
10. Каграманов Г.Г., Гуркин В.Н., Фарносова Е.Н. Влияние растворимости газов на эффективность мембранных процессов, на примере разделения смесей He/CH_4 и CO_2/CH_4 // Мембраны и мембранные технологии. 2020. Т. 10. № 4, С. 249–256. <https://doi.org/10.1134/S2218117220040069>
11. Патент № 114423 Российская Федерация, МПК B01D 53/00 (2006.01), B01D 63/02 (2006.01). Установка очистки природного газа высокого давления от гелия: № 2011145825/05: заявл.11.11.2011г.; опубл. 27.03.2012г. / Гулянский М.А., Докучаев Н.Л., Котенко А.А. и др.; заявители: ЗАО “Грасис”, ООО “Газпром развитие”.

Impact of Increased Helium Recovery Requirements from Natural Gas on Capital and Operational Performance of Two-Stage Membrane Equipment

V. I. Solomakhin

API-Technology LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: svi@api-tech.ru, 5174594@mail.ru

The article discusses consequences of increased requirements for the degree of helium recovery from helium-containing natural gas on the efficiency of two-stage membrane system are considered on the example of composition gas of the Kovykta field. With an increase in the degree of helium recovery $\geq 95\%$, there is a disproportionate increase in capital and operating costs. At the same time, methane losses in the composition of the “helium concentrate” are increasing. With a low influence of nonlinear effects, it is recommended to use a pressure 0.11–0.15 MPa abs. of the permeate gas. Use of two successive steps of gas separation at the second stage with different use of two permeated streams is a more effective technological solution for all basic characteristics than the version with a single-stage membrane block.

Keywords: membrane gas separation, helium-containing natural gas, two-stages membrane equipment, helium removal, gas treatment unit, multi-stages compressor system, methane losses