

СИСТЕМА УЛАВЛИВАНИЯ ЛЕГКИХ ФРАКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕМБРАННЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТ ИСПАРЕНИЯ

VAPOR RECOVERY SYSTEM BASED ON MEMBRANE MODULES FOR REDUCTION OF OIL PRODUCTS EVAPORATION LOSSES

К. А. Зайнетдинов

Konstantin A. Zaynetdinov

Санкт-Петербургский
горный университет,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Saint-Petersburg
Mining University,
Saint-Petersburg,
Russian Federation

Е. А. Любин

Evgeniy A. Lyubin

Санкт-Петербургский
горный университет,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Saint-Petersburg
Mining University,
Saint-Petersburg,
Russian Federation

В ходе транспортировки нефтепродуктов до потребителей неизбежны потери углеводородов. Основной их объем приходится на испарение из резервуаров.

На сегодняшний день большинство существующих средств сокращения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения либо очень дороги, либо не являются универсальными и не обеспечивают требуемой степени сокращения потерь. Наиболее перспективными являются системы улавливания легких фракций.

Учитывая уровень развития мембранных технологий последних лет, применение мембранных газоразделительных установок для разделения выбрасываемой из резервуаров паровоздушной смеси может позволить добиться сокращения потерь углеводородов от испарения.

В работе приводятся обоснование применения мембранных систем улавливания легких фракций, а также расчет параметров мембранного модуля по предложенной в статье методике, при которых будет эффективно его использование для сокращения потерь бензина от «больших дыханий» из резервуара РВС-5000.

Hydrocarbons losses are inevitable during oil products transportation to consumers. The major part of losses is related to evaporation from oil tanks.

Today the most part of the existing methods of oil and oil products evaporation losses reduction are either very expensive or not versatile and do not provide the required level of losses reduction. Vapor recovery systems are the most promising of them.

Considering the level of membrane technologies development of the last years, application of gas-separating membrane installations for division of vapor-air mixture which is thrown out from oil tanks is able to afford reduction of hydrocarbons evaporation losses.

The work contains justification of membrane vapor recovery systems application as well as calculations of membrane module parameters by the technique offered in this article at which its usage for reduction of petrol losses from out-breathing of the RVS-5000 tank will be effective.

Ключевые слова

ресурсосбережение,
нефтепродукты,
углеводороды, резервуары,
потери бензина от испарения,
сокращение потерь, система
улавливания легких фракций,
мембранная газоразделительная
установка, коэффициент
селективности мембраны

Key words

resource saving, oil products,
hydrocarbons, tanks,
petrol losses from evaporation,
reduction of hydrocarbons losses,
vapor recovery system,
membrane gas-separation
installation, calculation of membrane
modules parameters,
membrane selectivity coefficient

Введение

По разным оценкам, на пути следования жидких углеводородов от скважин до потребителей потери в общей сложности составляют до 5 % от объема добываемой нефти.

Оказавшись в атмосфере, углеводороды наносят большой вред окружающей среде и здоровью людей: работникам нефтебаз, перекачивающих станций, жителям близлежащих населенных пунктов и городов, в черте которых в результате их роста оказались нефтебазы.

Таким образом, сокращение потерь нефти и нефтепродуктов является актуальной задачей с экологической и экономической точек зрения, а затраты на разработку и эксплуатацию систем сокращения потерь могут быть рентабельными.

Системой улавливания легких фракций (УЛФ) называется совокупность технологического оборудования, обеспечивающая отбор и утилизацию легких фракций нефти и нефтепродуктов при повышении давления в газовом пространстве резервуара до того, как произойдет их «выдох» в атмосферу. Системы УЛФ обеспечивают большее сокращение потерь, чем традиционные средства (понтонные, плавающие крыши, газовые обвязки, газоуравнивательные системы), однако их стоимость, как правило, выше, так как они включают в себя энергопотребляющее оборудование, систему автоматического управления, а в ряде случаев и систему регенерации поглотителя паров нефти и нефтепродуктов [1].

В последние десятилетия мембранные технологии бурно развиваются. Газоразделительные мембраны могут быть использованы в нефтегазовой отрасли для разделения смеси воздуха и углеводородов и сокращения потерь последних от испарения.

Мембранные технологии

Сегодня мембранные технологии применяются в самых различных областях промышленности и во многих из них являются перспективными. К основным направлениям их развития относятся:

— мембранная очистка сточных вод с разделением ценных компонентов в машиностроении, текстильной, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, коммунальном хозяйстве и других отраслях;

— получение чистых газов (азота, кислорода, водорода и др.) из газовых смесей (воз-

дух, биогаз и др.) с помощью мембранных газоразделительных установок;

— бактериологический контроль воды, анализ сыворотки крови с помощью устройств на основе мембран;

— использование мембранных дозаторов лекарственных препаратов с контролируемой скоростью дозирования в ткани и органы, аппаратов для плазмофереза и оксигенации крови;

— разработка мембранных сенсоров и биосенсоров для высокочувствительных приборов и систем управления;

— изготовление катионпроводящих полимерных мембран для электрохимических генераторов и прочие [2].

В нефтегазовой промышленности мембранные технологии уже нашли свое применение при подготовке природного и попутного нефтяного газов с требуемыми свойствами для их сдачи в газотранспортную систему ПАО «Газпром». Компания «Грасис» предлагает использовать мембранные установки для уменьшения содержания сероводорода, углекислого газа и водяного пара в попутном газе для его дальнейшей транспортировки [3].

Для разделения газовой смеси с помощью мембранной технологии в промышленном масштабе обычно требуется большая поверхность мембраны. Для этого изготавливают специальный блок, содержащий мембрану, называемый мембранным модулем, который является основой мембранной установки.

Наибольшее распространение в последние годы получил полволоконный тип мембранных модулей, что обусловлено возможностью развивать значительно более высокие площади поверхности разделения за счет высокой плотности упаковки (до 20 000–30 000 м²/м³) и тем самым обеспечивать гораздо большую удельную производительность модуля. Аппараты данной конструкции представляют собой пучки полых волокон диаметрами 45–200 мкм, герметично закрепленные концами в корпусе цилиндрической формы.

Исходная смесь газов, подаваемая на вход мембранной установки для её последующего разделения, называется сырьевым потоком, который затем разделяется в мембранном модуле. Газы, прошедшие через мембрану, образуют пермеатный поток, а газы, не пропущенные мембраной, — ретентатный поток [4].

Разделение смеси происходит за счет разницы парциальных давлений на внешней и

внутренней поверхностях полуволоконной мембраны. Газы, «быстро» проникающие через полимерную мембрану поступают внутрь волокон и выходят из мембранного модуля через один из выходных патрубков. Газы, «медленно» проникающие через мембрану, выходят из мембранного модуля через другой выходной патрубков [3].

Процесс проникновения газов через мембрану осуществляется по диффузионному и сорбционному механизмам: молекулы газа сорбируются на поверхности мембраны, диффундируют через матрицу полуволоконной мембраны и десорбируются с обратной стороны мембраны.

Основными параметрами мембраны, определяющими процесс разделения, являются проницаемость (количество вещества, проходящего через единицу площади мембраны в единицу времени при единичном среднем градиенте парциального давления газов) и селективность (отношение проницаемостей компонентов, определяющее разделительную способность мембраны).

Селективность разделения (при неизменности внешних факторов) определяется исключительно внутренней структурой материала мембраны, а проницаемость зависит от толщины разделительного слоя мембраны. Мембраны, используемые для газоразделения, должны обладать высокой проницаемостью и обеспечивать относительно высокую селективность [5].

Важным преимуществом применения мембранных установок является их длительный срок службы. К примеру, на официальном сайте компании «Криогенмаш» приводятся сведения, что срок службы их мембранных газоразделительных установок составляет минимум 10 лет [6].

Если паровоздушную смесь (ПВС) из резервуаров сжимать при помощи компрессора

и пропускать через такую мембранную установку, можно добиться сокращения потерь нефтепродуктов от испарения. Степень улавливания паров углеводородов будет зависеть от селективности мембранных модулей, а производительность установки от проницаемости компонентов ПВС.

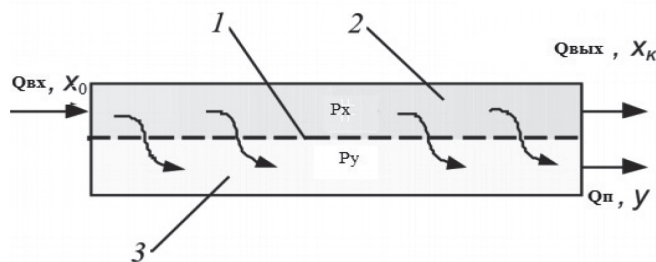
Мембранные системы УЛФ упоминаются в некоторых источниках и оцениваются как не самые эффективные. Например, в работе [7] отмечается, что мембранный способ разделения обеспечивает низкую пропускную способность и не подходит для разделения ПВС, состоящей более чем из трех компонентов. В работе [8] по результатам технико-экономического анализа сделан вывод об убыточности систем УЛФ, в том числе мембранных, в низком диапазоне производительности от 17,2 до 137,4 м³/ч.

Однако автор работ [9, 10] утверждает, что способ разделения ПВС на мембранах может снизить затраты на рекуперацию паров нефтепродуктов на АЗС, является перспективным и энергоэффективным. Кроме того, известны устройства на основе мембранных модулей, предназначенные для улавливания паров нефтепродуктов на АЗС [11] и для очистки от углеводородов ПВС, выбрасываемых при заполнении емкостей с бензином [12].

Стоит отметить, что каких-либо расчетов, связанных с параметрами мембранных модулей, или экспериментальных подтверждений в перечисленных выше работах не приводится. Поэтому, учитывая стремительность развития мембранных технологий, данный метод сокращения потерь нефтепродуктов от испарения должен быть рассмотрен более тщательно.

Методика расчета газоразделительного мембранного модуля

Упрощенная схема мембранного модуля представлена на рисунке 1.



1 — мембрана; 2 — надмембранное пространство; 3 — дренажный канал;
 $Q_{вх}$, $Q_{вых}$, $Q_{п}$ — объемные расходы соответственно сырьевого, ретентатного и пермеатного потоков; P_x и P_y — давления над мембраной и в дренажном канале;
 X_0 , X_k и y — концентрации компонентов сырьевого, ретентатного и пермеатного потоков

Рисунок 1. Схема мембранного модуля

На количество каждого компонента газовой смеси, которое проникает через мембрану, влияют два основных фактора: разность парциальных давлений $\Delta P_i = P_x x_i - P_y y_i$ и площадь поверхности мембраны S (чем больше эти показатели, тем больше молекул перейдет в дренажный канал, в котором формируется пермеатный поток). Тогда для каждого компонента можно записать

$$Q_{Pi} = K_i S \Delta P_i, \quad (1)$$

где K_i — коэффициент проницаемости i -го компонента через мембрану, который показывает, сколько кубических метров чистого i -го компонента пройдет за единицу времени через 1 м^2 мембраны при единичном перепаде давления, $[K] = \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па}}$.

Для упрощения допустим, что ПВС состоит не из множества компонентов, а из двух: углеводороды — 1 и воздух — 2. Тогда расход компонентов в пермеатном потоке

$$Q_{P1} = K_1 S (P_x x - P_y y) = Q_{Py}; \quad (2)$$

$$Q_{P2} = K_2 S (P_x (1-x) - P_y (1-y)) = Q_{Px} (1-y), \quad (3)$$

где x и y — концентрации 1-го компонента (углеводородов) в надмембранном пространстве и в пермеатном потоке соответственно.

Разделив (2) на (3), получим уравнение состояния мембраны [13]:

$$\alpha \frac{x - \varphi y}{1 - x - \varphi(1-y)} = \frac{y}{1-y}, \quad (4)$$

где $\alpha = K_1/K_2$ — безразмерный коэффициент селективности мембраны, $\varphi = P_y/P_x$ — отношение давлений после мембраны и до нее.

Однако концентрация углеводородов над мембраной x не является постоянной величиной. Она изменяется от концентрации на входе в мембранный модуль x_0 до концентрации на выходе из него x_k . Примем $x = (x_0 + x_k)/2$ и преобразуем уравнение (4):

$$\alpha \frac{x_0 + x_k - 2\varphi y}{2 - x_0 - x_k - 2\varphi(1-y)} = \frac{y}{1-y}. \quad (5)$$

Вторым уравнением, необходимым для расчета газоразделительного модуля, является закон сохранения массы, записанный для паров углеводородов через их массовые концентрации и массовый расход ПВС, равный произведению объемных расходов и плотности ПВС:

$$\bar{x}_0 Q_{\text{вх}} \rho_{\text{ПВСх}} - \bar{y} Q_{\text{н}} \rho_{\text{ПВСy}} = \bar{x}_k (Q_{\text{вх}} \rho_{\text{ПВСх}} - Q_{\text{н}} \rho_{\text{ПВСy}}). \quad (6)$$

Считая плотность ПВС и ее молярную массу аддитивными величинами [14], а температуру в мембране — постоянной, с учетом

уравнения Менделеева-Клапейрона уравнение (6) может быть переписано через объемные концентрации компонентов, их молярные массы и давления до мембраны и после нее:

$$\begin{aligned} & \frac{x_0 \cdot \mu}{1 + x_0 \cdot (\mu - 1)} Q_{\text{вх}} P_x (x_0 \cdot M_{\text{вБ}} + (1 - x_0) \cdot M_{\text{Б}}) - \\ & - \frac{y \cdot \mu}{1 + y \cdot (\mu - 1)} Q_{\text{н}} P_y (y \cdot M_{\text{вБ}} + (1 - y) \cdot M_{\text{Б}}) = \\ & = \frac{x_k \cdot \mu}{1 + x_k \cdot (\mu - 1)} (Q_{\text{вх}} P_x (x_0 \cdot M_{\text{вБ}} + (1 - x_0) \cdot M_{\text{Б}}) - \\ & - Q_{\text{н}} P_y (y \cdot M_{\text{вБ}} + (1 - y) \cdot M_{\text{Б}})), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mu = M_{\text{вБ}}/M_{\text{Б}}$ — отношение молярных масс паров углеводородов и воздуха.

Уравнение (7) можно упростить путем введения безразмерных коэффициентов: отношения давлений φ , отношения молярных масс μ и коэффициента расхода $\theta = Q_{\text{н}}/Q_{\text{вх}}$. Выполнив необходимые преобразования, получим зависимость, связывающую концентрации углеводородов x_0 , x_k и y через коэффициенты φ и θ :

$$x_k - x_0 = \theta \varphi (x_k - y). \quad (8)$$

Два полученных уравнения (5), (8) образуют систему, решение которой описывает процесс разделения двухкомпонентной смеси в мембранном модуле:

$$\begin{cases} \alpha \frac{x_0 + x_k - 2\varphi y}{2 - x_0 - x_k - 2\varphi(1-y)} = \frac{y}{1-y} \\ x_k - x_0 = \theta \varphi (x_k - y) \end{cases} \quad (9)$$

Определение параметров мембранного модуля

При помощи системы (9) можно решить любую задачу, связанную с мембранным разделением двухкомпонентной газовой смеси.

Определим параметры мембранной системы УЛФ, при которой будет обеспечиваться достаточное сокращение потерь бензина от испарения.

Концентрацию углеводородов x_0 на входе примем равной концентрации насыщенных паров бензина, которая обычно достигается в конце закачки (будем считать, что паровоздушная смесь состоит из идеальных газов и их концентрации не изменяются при сжатии в компрессоре).

Концентрация насыщенных паров бензина C_s определяется по формуле

$$C_s = \frac{P_s}{P_{\Gamma}}, \quad (10)$$

где P_{Γ} — давление в газовом пространстве при открытии клапана давления (на 2000 Па больше атмосферного); P_s — давление насыщенных паров, которое зависит от темпера-

туры в газовом пространстве, соотношения газовой и жидкой фаз в резервуаре, от давления насыщенных паров нефтепродукта по Рейду [14]:

$$P_s = 1,22P_R \cdot e^{-b_s(311-T_r)} \cdot f\left(\frac{V_{ПВС}}{V_B}\right), \quad (11)$$

$$f\left(\frac{V_{ПВС}}{V_B}\right) = \begin{cases} 1,41 - 0,25 \cdot \left(\frac{V_{ПВС}}{V_B}\right)^{0,37}, & \frac{V_{ПВС}}{V_B} \leq 4 \\ 1,15 - 0,063 \cdot \left(\frac{V_{ПВС}}{V_B}\right)^{0,629}, & \frac{V_{ПВС}}{V_B} > 4 \end{cases} \quad (12)$$

Коэффициент b_s в формуле (11) равен $0,034 \text{ К}^{-1}$ (для автомобильных бензинов) [14].

В качестве исходных примем характеристики резервуара РВС-5000 (таблица 1), в который бензин ($1,22 \cdot P_R = 57000 \text{ Па}$) закачивается с расходом $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре в газовом пространстве резервуара $T_r = 20 \text{ }^\circ\text{С}$.

Необходимо учесть, что объемный расход газа при сжатии в компрессоре будет меньше, чем расход закачки бензина в резервуар. Температура газа при сжатии возрастет. Считая процесс сжатия в компрессоре адиабатным, получим

$$Q_{вх} = Q_{зак} \cdot \left(\frac{P_r}{P_x}\right)^{\frac{1}{k}} \approx Q_{зак} \cdot \varphi^{\frac{1}{k}}; \quad (13)$$

$$T_x = T_r \cdot \left(\frac{P_r}{P_x}\right)^{\frac{1-k}{k}} \approx T_r \cdot \varphi^{\frac{1-k}{k}}, \quad (14)$$

где T_x — температура газовой смеси после сжатия; k — показатель адиабаты паровоздушной смеси.

Для того, чтобы определить показатель адиабаты ПВС, будем считать его аддитивной величиной.

Показатель адиабаты воздуха при $20 \text{ }^\circ\text{С}$ равен 1,4.

Показатель адиабаты паров углеводородов оценим исходя из молярной массы паров бензина, которую можно вычислить в зависимости от температуры начала кипения бензина [14] по формуле

$$M_{vB} = 60,9 - 0,306 \cdot T_{HK} + 0,001 \cdot T_{HK}^2 \quad (15)$$

В таблице 2 представлены показатели адиабаты паров первых алканов при температурах $0 \text{ }^\circ\text{С}$ и $100 \text{ }^\circ\text{С}$. При $T_{HK} = 309 \text{ К}$ молярная масса паров бензина составляет $61,8 \text{ кг/кмоль}$. Это может означать, что преобладающими компонентами ПВС являются пары бутана и пентана, что соответствует данным о составе ПВС, приведенным в работе [15].

Согласно таблице 2 показатель адиабаты паров бензина при $20 \text{ }^\circ\text{С}$ равен 1,0874.

В результате расчета по формулам (10)–(12) концентрация паров бензина на входе в мембранный модуль $x_0 = C_s = 0,408$. Тогда показатель адиабаты ПВС данного состава $k_{ПВС} = 1,2725$.

Примем, что при $20 \text{ }^\circ\text{С}$ половина изначального потока ПВС (приведенного к внешним условиям) проходит через мембрану, т.е. с учетом формул (13), (14)

$$\frac{Q'_n}{Q_{зак}} = \frac{Q_n \cdot \varphi^{\frac{k-1}{k}}}{Q_{вх} \cdot \varphi^{\frac{1}{k}}} = \theta \varphi = 0,5 \Rightarrow \theta = \frac{0,5}{\varphi}.$$

И при этом пермеатный поток содержит 15 % углеводородов ($y = 0,15$). Эффективность сокращения потерь нефтепродуктов от испарения, которую можно вычислить по формуле

$$E = \left(1 - \frac{y \cdot Q'_n}{x_0 \cdot Q_{зак}}\right) \cdot 100 \%, \quad (16)$$

в таком случае будет равна 81,61 %.

Теперь систему (9) можно решить относительно переменных α и x_k , задаваясь различными значениями φ (или P_x , считая давление в дренажном канале P_y атмосферным). После чего по формулам (2), (3) можно найти характеристики мембраны K_1S и K_2S , показывающие, какой объем (м^3) соответствующего компонента газовой смеси проходит через мембрану за единицу времени (ч) при перепаде давления в $0,1 \text{ МПа}$. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 1. Параметры РВС-5000

Высота стенки, м	11,92	Диаметр, м	22,8
Высота влива бензина, м	11	Геометрический объем, м^3	4866,7
Высота конуса крыши, м	0,57	Объем конуса крыши, м^3	77,57

Таблица 2. Показатели адиабаты паров углеводородов [16]

C_nH_{2n+2}	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}
Молярная масса, кг/кмоль	16	30	44	58	72	86
$0 \text{ }^\circ\text{С}$	1,314	1,202	1,138	1,097	1,077	1,063
$100 \text{ }^\circ\text{С}$	1,268	1,154	1,102	1,075	1,060	1,050

Таблица 3. Результаты вычислений при $y = 0,15$ и температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$

P_x , атм	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
φ	0,5	0,333	0,25	0,2	0,167	0,143	0,125	0,111	0,100	0,091
θ	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
x_k	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666
α	0,015	0,065	0,089	0,102	0,111	0,117	0,122	0,125	0,128	0,130
$1/\alpha$	68,631	15,344	11,290	9,798	9,023	8,548	8,227	7,995	7,821	7,684
K_1S , м ³ /(атм·ч)	56,511	38,981	30,315	25,063	21,505	18,919	16,947	15,387	14,119	13,066
K_2S , м ³ /(атм·ч)	3878,358	598,130	342,265	245,572	194,036	161,718	139,415	123,020	110,416	100,394

Чем дальше значение коэффициента селективности α от единицы, тем сложнее изготовить такую мембрану. Исходя из данных таблицы 3, видно, что при увеличении давления в надмембранном пространстве значение α приближается к единице, но скорость изменения требуемого коэффициента селективности значительно уменьшается, что делает дальнейшее повышение давления нецелесообразным. Будем считать оптимальными результаты вычислений при $P_x = 8$ атм.

Изменяя принятое значение y , посмотрим, какие значения коэффициентов селективности α (или обратных им величин $1/\alpha$, имеющих тот же физический смысл) требуются для достижения заданных условий. На рисунке 2 представлены графики зависимости требуемого коэффициента селективности и эффективности сокращения выбросов углеводородов в атмосферу от выбранной концентрации y .

Как видно из графиков на рисунке 2, низкие значения концентрации углеводородов в пермеатном потоке требуют высоких (далеких от единицы) степеней селективности мембраны, в то время как при высоких ее значе-

ниях падает эффективность сокращения потерь. Исходя из этого, значения коэффициента селективности $1/\alpha = 8,227$ и характеристики мембраны $K_1S = 16,947\text{ м}^3/(\text{атм}\cdot\text{ч})$ являются оптимальными.

Воспользовавшись полученными значениями, можно решить любую задачу для мембранной установки с данными параметрами. Для этого необходимо использовать систему из двух уравнений (9) и уравнения (2).

Определим эффективность сокращения потерь бензина от «больших дыханий» из резервуара с характеристиками, представленными в таблице 1, при его заполнении с расходом $600\text{ м}^3/\text{ч}$ и использовании мембранной системы УЛФ с полученными параметрами. Если начальная концентрация углеводородов в ПВС составляет $0,2$, то средняя концентрация за время закачки, рассчитанная по методике, приведенной в [14], окажется равной $0,344$. В таком случае средняя концентрация углеводородов в пермеатном потоке $y = 0,12$, а расход пермеатного потока, следовательно эффективность сокращения потерь, по формуле (16) составит 81% .

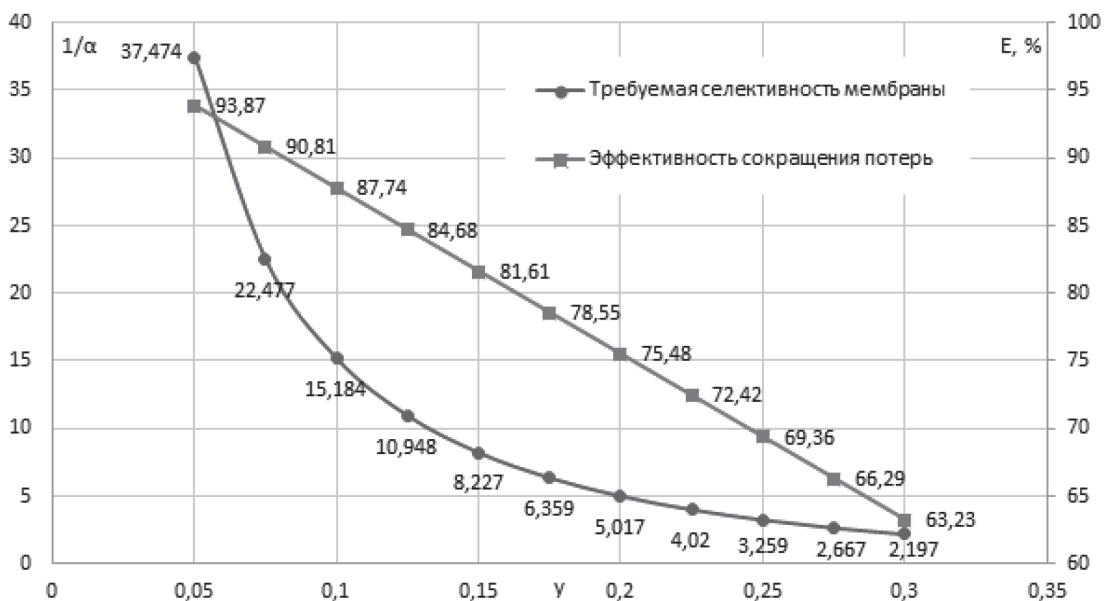


Рисунок 2. Графики зависимости требуемого коэффициента селективности и эффективности сокращения потерь от y при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Вывод

Необходимо отметить, что приведенная методика подходит для упрощенного расчета, но на самом деле ПВС содержит множество компонентов с различными коэффициентами проницаемости. Кроме того, мембрану, надмембранное пространство и дренажный канал (рис. 1) необходимо разбить на мелкие участки и рассматривать их отдельно. Как минимум дважды придется прибегнуть к методу итераций, поскольку нам изначально неизвестны концентрации компонентов в пермеатном и ретентатном потоках в конце каждого из участков.

Основные проблемы, связанные с изучением технологии мембранного разделения ПВС, заключаются в том, что компонентный состав ПВС, являющийся одним из основных исходных данных для расчетов, зависит от множества факторов, таких как состав хранимого нефтепродукта и внешние условия при хранении. Кроме того, проницаемости каждого из компонентов ПВС различны для каждого типа мембран. Единственным методом получения достоверной информации о параметрах мембраны при работе на нетипичных

компонентах следует считать собственный эксперимент [13].

Полученные значения эффективности сокращения потерь будут выполняться, если не прошедший через мембрану, нагретый и сжатый после компрессора поток, насыщенный углеводородами, не будет выбрасываться в атмосферу. Существует несколько решений использования ретентатного потока:

1. Закачка насыщенной углеводородами ПВС в газовые баллоны и ее использование для собственных нужд предприятия;

2. Подача насыщенной углеводородами ПВС в резервуар вместе с закачиваемым в него нефтепродуктом, в результате чего большая часть паров углеводородов будет абсорбироваться;

3. Проведение дополнительных стадий разделения ПВС при помощи как мембранных модулей, так и других систем УЛФ.

Создание комбинированных систем УЛФ с применением мембранных модулей может оказаться наиболее перспективным из представленных решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коршак А.А. Ресурсо- и энергосбережение при транспортировке и хранении углеводородов. Ростов н/Д: Феникс, 2016. 411 с.

2. Платэ Н.А. Мембранные технологии – авангардное направление развития науки и техники XXI века // Мембраны. 1999. № 1. С. 4–13.

3. Мембранное разделение газов. НИК Грасис. URL: <http://www.grasys.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-gazov> (дата обращения: 01.03.2018).

4. Бекман И.Н. Мембраны в медицине. Курс лекций. URL: <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm> (дата обращения: 01.03.2018).

5. Половолоконные газоразделительные мембраны. НИК Промтегра. URL: <http://www.promtegra.ru/polovolokonnye-gazorazdelitelnye-membrany/> (дата обращения: 01.03.2018).

6. Мембранные газоразделительные установки. ПАО Криогенмаш. URL: <http://www.cryogenmash.ru/catalog/membrannye-ustanovki/> (дата обращения: 01.03.2018).

7. Варнаков В.В., Марцев Ю.П. Сокращение потерь топлива при хранении // Международный научный журнал. 2008. № 1. С. 75–80.

8. Беккер А.В., Николайчук С.Н. Выбор оптимальных технических решений для улавливания углеводородных паров от резервуарных парков нефти // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Междунар. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск: НИТПУ, 2016. С. 458–459.

9. Варнакова Е.А. Перспективные способы снижения потерь нефтепродуктов на АЗС и оценка ущерба от выбросов паров нефтепродуктов в атмосферу // Международный технико-экономический журнал. 2013. №3. С. 99–103.

10. Варнакова Е.А. Совершенствование технологии заправки автотранспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 175 с.

11. Патент РФ № 157866. Устройство улавливания паров нефтепродуктов на АЗС с разделением паровоздушной смеси на мембранах / Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Платонов А.В., Варнакова Е.А. Заявл. 27.03.2015. 2015. Бюл. № 35.

12. Патент РФ № 2287096. Способ работы насосно-эжекторной установки в системе очистки от углеводородов парогазовой среды, образующейся при хранении бензина или при заполнении им емкости / Цегельский В.Г. Заявл. 25.04.2005. 2016. Бюл. № 31.

13. Бондаренко В.Л., Лосяков Н.П., Симоненко Ю.М., Чулкин А.П., Кузьменко И.Ф., Талакин О.Г. Мембранное разделение газовых смесей на основе компонентов воздуха // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № S8. С. 20–40.

14. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. 658 с.

15. Любин Е.А. Обоснование технологии улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с использованием насосно-эжекторной установки: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 185 с.

16. Дубовкин Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 288 с.

REFERENCES

1. Korshak A.A. *Resurso- i energosberezhenie pri transportirovke i khraneniі uglevodorodov* [Resource and Energy Saving During Transportation and Storage of Hydrocarbons]. Rostov n/D, Feniks Publ., 2016. 411 p. [in Russian].
2. Plate N.A. Membrannye tekhnologii — avangardnoe napravlenie razvitiya nauki i tekhniki XXI veka [Membrane Technologies—the Avant-Garde Direction of Science and Technology of the XXI Century]. *Membrany — Membranes*, 2002, No. 1, pp. 4–13. [in Russian].
3. *Membrannoe razdelenie gazov. NPK Grasis* [Membrane Gas Separation. RPC Grasis]. Available at: <http://www.grasis.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-gazov> (accessed: 01.03.2018). [in Russian].
4. Bekman I.N. *Membrany v meditsine. Kurs lektsii* [Membranes in Medicine. Course of Lectures]. Available at: <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm> (accessed: 01.03.2018). [in Russian].
5. *Polovolokonnye gazorazdelitel'nye membrany. NPK Promtegra* [Half-Fiber Gas Separation Membranes. RPC Promtegra]. Available at: <http://www.promtegra.ru/polovolokonnye-gazorazdelitelnye-membrany/> (accessed: 01.03.2018). [in Russian].
6. *Membrannye gazorazdelitel'nye ustanovki. PAO Kriogenmash* [Membrane Gas Separation Plants. PJSC Kriogenmash]. Available at: <http://www.cryogenmash.ru/catalog/membrannye-ustanovki/> (accessed: 01.03.2018) [in Russian].
7. Varnakov V.V., Martsev Yu.P. Sokrashchenie poter' topliva pri khraneniі [Reduction of Fuel Losses During Storage]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal — International Scientific Journal*, 2008, No. 1, pp. 75-80. [in Russian].
8. Bekker A.V., Nikolaichuk S.N. Vybor optimal'nykh tekhnicheskikh reshenii dlya ulavlivaniya uglevodorodnykh parov ot rezervuarnykh parkov nefti [The Choice of Optimal Technical Solutions for the Capture of Hydrocarbon Vapors from Oil Tank Farms]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of the XX International Symposium Named After Academician M.A. Usov Students and Young Scientists Dedicated to the 120th Anniversary of the Founding of the Tomsk Polytechnic University «Problems of Geology and Mining»]. Tomsk, NRTPU, 2016, pp. 458–459. [in Russian].
9. Varnakova E.A. Perspektivnye sposoby snizheniya poter' nefteproduktov na AZS i otsenka ushcherba ot vybrosov parov nefteproduktov v atmosferu [Promising Methods of Oil Losses Reduction at the Gas Stations and Evaluation of the Damage of Oil Vapor Emissions into the Atmosphere]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal — The International Technical-Economic Journal*, 2013, No. 3, pp. 99–103. [in Russian].
10. Varnakova E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii zapravki avtotransportnykh sredstv: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the Technology of Refueling Vehicles: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2016. 175 p. [in Russian].
11. Varnakov D.V., Varnakov V.V., Platonov A.V., Varnakova E.A. *Ustroistvo ulavlivaniya parov nefteproduktov na AZS s razdeleniem parovozdushnoi smesi na membranakh* [The Device of Petroleum Products at Filling Stations with Split Air-Steam Mixture on the Membranes]. Patent RF, No. 157866, 2015. [in Russian].
12. Tsegel'skii V.G. *Sposob raboty nasosno-ezhektornoі ustanovki v sisteme ochistki ot uglevodorodov parogazovoi sredy, obrazuyushcheysya pri khraneniі benzina ili pri zapolnenii im emkosti* [Method of Operation of the Pump-Ejector Unit in the System of Purification from Hydrocarbons of the Vapor-Gas Environment Formed During Storage of Gasoline or When Filling the Tank with It]. Patent RF, No. 2287096, 2016. [in Russian].
13. Bondarenko V.L., Losyakov N.P., Simonenko Yu.M., Chuklin A.P., Kuz'menko I.F., Talakin O.G. Membrannoe razdelenie gazovykh smesei na osnove komponentov vozdukhа [Membrane Separation of Gas Mixtures Based on Air Components]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroeniye» — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, No. S8, pp. 20–40. [in Russian].
14. Tugunov P.I., Novoselov V.F., Korshak A.A., Shamrazov A.M. *Tipovye raschety pri proektirovaniі i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov* [Typical Calculations in the Design and Operation of Oil Depots and Pipelines]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2002. 658 p. [in Russian].
15. Lyubin E.A. *Obosnovanie tekhnologii ulavlivaniya parov nefti iz rezervuarov tipа RVS s ispol'zovaniem nasosno-ezhektornoі ustanovki: dis. kand. tekhn. Nauk* [Substantiation of the Technology of Capturing Oil Vapor from Storage Tanks Type RVS from Using the Pump-Ejector Installation: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, 2010. 185 p. [in Russian].
16. Dubovkin N.F. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam uglevodorodnykh topliv i ikh produktov sgoraniya* [Reference Book on Thermophysical Properties of Hydrocarbon Fuels and their Combustion Products]. Moscow — Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 288 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Зайнетдинов Константин Артурович, магистрант кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Konstantin A. Zaynetdinov, Undergraduate Student of Oil and Gas Transportation and Storage Department, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: kz-ufa@yandex.ru

Любин Евгений Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Evgeniy A. Lyubin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Transportation and Storage Department, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation