

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF106899>

# Очистка газовых смесей от малых примесей в противоточном мембранном модуле: инженерная методика расчета

А.Ю. Окунев

Государственный университет по землеустройству, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

Одна из задач мембранного газоразделения — извлечение из газовых смесей высокопроникающих примесей малого содержания.

Процесс газоразделения достаточно эффективно организуют в мембранных модулях полволоконного типа.

В рамках настоящей статьи предпринята попытка разработки инженерной методики расчета очистки газовых смесей от малых примесей в противоточном мембранном модуле, которая без использования процедур численного интегрирования и итераций позволит рассчитывать режим разделения с применением аналитических зависимостей.

Проанализирована математическая модель процесса газоразделения бинарных смесей с малым содержанием высокопроникающего компонента для решения задач очистки газовых смесей, в том числе осушки. Проведены параметрические исследования процесса и разработана инженерная методика расчета, позволяющая рассчитывать разделение в модуле без использования сложных, ресурсоемких алгоритмов с аналитическими формулами. При параметрическом исследовании в качестве ограничения произведено рассмотрение разделения бинарной газовой смеси. Методика апробирована на примере осушки воздуха в модуле с мембраной ПВТМС (поливинилтриметилсилана), в приближении бинарной смеси, численные и аналитические результаты хорошо согласуются между собой, при этом расчет по разработанной методике требует на несколько порядков меньшего количества вычислений, и даже может проводиться вручную.

**Ключевые слова:** модель процесса газоразделения; инженерная методика расчета; очистка газовых смесей; осушка воздуха.

## Как цитировать:

Окунев А.Ю. Очистка газовых смесей от малых примесей в противоточном мембранном модуле: инженерная методика расчета // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 3. С. 129–136. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF106899>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF106899>

# Purification of gas mixtures based on the removal of small impurities from a counterflow membrane module: engineering calculation method

Alexander Yu. Okunev

State University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

One of the tasks of the membrane gas separation process is the extraction of low-content highly penetrating impurities from gas mixtures.

The gas separation process is efficiently organized using hollow fiber-type membrane modules.

In this study, an attempt was made to develop an engineering method for calculating the purification of gas mixtures based on the removal of small impurities from a countercurrent membrane module, which would enable the calculations related to the separation mode using analytical dependencies, without the use of numerical integration procedures and iterations.

A mathematical model representing the gas separation process from binary mixtures having low content of a highly penetrating component was analyzed to address the challenges related to cleaning, purifying, and drying gas mixtures. Parametric studies related to the process were carried out and an engineering calculation method that enabled calculating separation in the module without using complex, resource-intensive algorithms having analytical formulas was developed herein. During the parametric study, the separation of a binary gas mixture was considered a limiting case. The proposed method was tested with respect to the example of air drying in a module comprising a (polyvinyltrimethylsilane) PVTMS membrane, which was an approximation of a binary mixture. The numerical and analytical results of the calculation are consistent with each other, and the calculation herein based on the developed method requires several orders of magnitude fewer calculations, that can even be performed manually.

**Keywords:** gas separation process model; engineering method of calculation; purification of gas mixtures; air drying.

## To cite this article:

Okunev AY. Purification of gas mixtures based on the removal of small impurities from a counterflow membrane module: engineering calculation method. *Refrigeration Technology*. 2021;110(3):129–136. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF106899>

## ВВЕДЕНИЕ

К задачам газоразделения относится осушка газовых смесей [1], предварительное обогащение гелия из природного газа и водорода — из технологических смесей, удаление сероводорода и углекислого газа из природного газа и др.

Очистка от таких примесей и их концентрирование осуществляется за счет различной проницаемости мембраны по отношению к компонентам газовой смеси и перепада давлений на мембране. При этом наиболее эффективно — разделение в модулях, работающих в противоточном режиме: поток высокого давления движется вдоль мембраны в направлении, противоположном потоку низкого давления, с другой стороны мембраны. Мембрана при этом представляет собой композиционное (или асимметричное) полое волокно, в котором на пористую основу (подложку) наносится тонкий непористый (селективный) слой полимера. Именно этот непористый слой обеспечивает разделение газовой смеси, а его химический состав и структура обуславливают селективные свойства мембраны и мембранного модуля в целом. Непористый слой называется так условно: он может содержать микропустоты (свободный объем [2]), транспорт через которые различных газов может быть существенно различен, что при макроскопическом рассмотрении часто упрощают. Упрощение заключается в применении модели «растворение–диффузия»: транспорт рассматривается через непористую мембрану, как через слой жидкости постоянной толщины в приближении малых концентраций растворенного газа (выполняется закон Генри для сорбции, транспорт компонент газовой смеси идет независимо друг от друга), при этом влияние вязкого транспорта газа внутри пористой подложки обычно не учитывается.

В данном случае, в приближении идеального газа плотность потока  $i$ -го компонента газовой смеси  $J_i$  через мембрану может быть записана в виде [3]

$$J_i = Q_i P_h (c_i - \gamma c'_i), \tag{1}$$

где  $Q_i$  — проницаемость мембраны по  $i$ -му компоненту,  $\frac{\text{нм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{ата}}$ : нм<sup>3</sup> — нормальный кубометр — количество

вещества идеального газа, который займет один кубический метр объема при температуре 0 °С и давлении 101,3 кПа);  $P_h$  — давление газовой смеси в потоке высокого давления;  $\gamma = P_l / P_h$  — отношение давлений в потоках низкого и высокого давления;  $c_i, c'_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента в потоках высокого и низкого давления, соответственно.

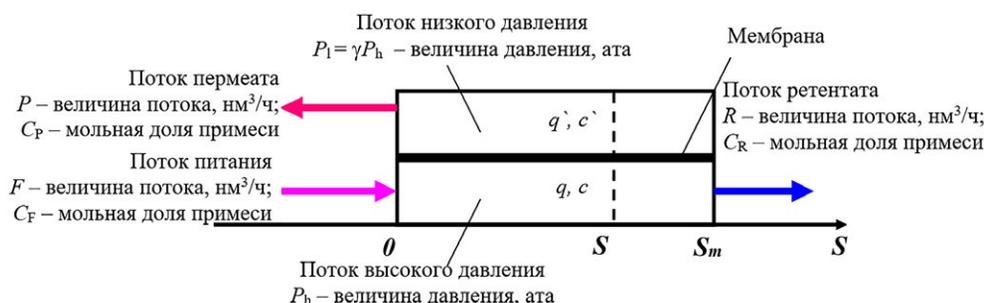
При описании переноса в мембранном газоразделительном модуле часто используется модель идеального вытеснения, отвечающая следующим ограничениям:

- отсутствует перемешивание вдоль потоков газовой смеси;
- полное перемешивание происходит поперек потоков газовой смеси;
- потери давления в потоках незначительны.

Режим течения, близкий к идеальному вытеснению достаточно хорошо реализуется на практике, при этом наиболее эффективен противоточный режим [4]. Методы моделирования, базирующиеся на модели идеального вытеснения в полостях газоразделительного модуля и на модели растворение–диффузия, описывающей транспорт через мембрану (1), широко применяются для оптимизации мембранных процессов и проектирования установок [4, 5].

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА

Ограничимся рассмотрением разделения бинарной газовой смеси. Примем удаляемую примесь за первый компонент, а очищаемую смесь — за второй.



**Рис. 1.** Схема процесса мембранной очистки газовой смеси в противоточном трехходовом модуле.

**Fig. 1.** Schematic diagram of the membrane purification process of a gas mixture in the countercurrent three-way module.

Введем обозначения, как представлено на рис. 1, тогда система уравнений переноса в мембранном модуле сводится к следующей формуле:

$$\begin{cases} \frac{d(qc)}{dS} = -Q_1 P_h (c - \gamma c') \\ \frac{d(q'c)}{dS} = \frac{d(qc)}{dS} \\ \frac{dq}{dS} = -Q_1 P_h (c - \gamma c') - Q_2 P_h (1 - c - \gamma(1 - c')) \\ \frac{dq'}{dS} = -\frac{dq}{dS} \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия для системы записываются в виде

$$\begin{cases} q|_{S=0} = q_F \\ c|_{S=0} = c_F \\ q'|_{S=S_m} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия (3) следует дополнить условием для концентрации примеси в потоке низкого давления при  $S=S_m$ , в качестве которого может быть использовано любое, отвечающее требованиям ограничение

$$\begin{cases} \left. \frac{d(qc)}{dS} \right|_{S=S_m} < 0 \\ \left. \frac{dq}{dS} \right|_{S=S_m} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

В качестве такого условия может быть выбрано следующее:

$$c'|_{S=S_m} = \frac{Q_1 (c|_{S=S_m} - \gamma c'|_{S=S_m})}{Q_1 (c|_{S=S_m} - \gamma c'|_{S=S_m}) + Q_2 (1 - c|_{S=S_m} - \gamma(1 - c'|_{S=S_m}))},$$

которое соответствует тому, что концентрация примеси в потоке низкого давления в сечении  $S=S_m$  равна доле потока примеси через мембрану по отношению к полному потоку. Но вместо этого условия, как показывают результаты расчетов, можно использовать и более простые, также удовлетворяющие требованиям (4), например  $c'|_{S=S_m} = c|_{S=S_m}$ . Возможность варьирования граничного условия по концентрации в физическом смысле означает независимость состава выходных потоков от состава входного потока низкого давления при его бесконечно малой величине ( $q'|_{S=S_m} \rightarrow 0$ ). Условие (4) при этом необходимо для численной устойчивости процесса интегрирования системы уравнений (2), (3).

В (2), (3)  $q$  — величина потока газовой смеси высокого давления в сечении модуля с координатой по площади  $S$ ,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $c$  — мольная доля примеси в данном потоке;  $q'$  — величина потока газовой смеси низкого давления в сечении модуля с координатой по площади  $S$ ,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $c'$  — мольная доля примеси в данном потоке.

Ограничиваясь случаем малого содержания примеси в потоках ( $c \ll 1$ ;  $c' \ll 1$ ) и большей проницаемостью мембраны по отношению к примеси, чем к очищаемой

смеси ( $\alpha = \frac{Q_1}{Q_2} > 1$ ), что характерно для задач осушки

газовых смесей, удаления углекислого газа, предварительного обогащения гелия и др., систему (2), (3) можно переписать в безразмерном виде

$$\begin{cases} \frac{d(\tilde{q}c)}{dx} = -\chi(c - \gamma c') \\ \frac{d(\tilde{q}'c')}{dx} = \frac{d(\tilde{q}c)}{dx} \\ \frac{d\tilde{q}}{dx} = \frac{d\tilde{q}'}{dx} = -\frac{\chi}{\alpha}(1 - \gamma) \\ \tilde{q}|_{x=0} = 1 \\ \tilde{q}'|_{x=1} = 0 \\ c|_{x=0} = C_F \end{cases} \quad (5)$$

где  $\tilde{q} = \frac{q}{F}$ ,  $\tilde{q}' = \frac{q'}{F}$  — безразмерные потоки высокого и низкого давления, соответственно;  $\chi = \frac{Q_1 P_h S_m}{F}$  —

критерий подобия, характеризующий производительность мембранного модуля по отношению к удаляемой примеси;  $x = S / S_m$  — безразмерная площадь мембраны.

В рассматриваемом случае малых концентраций примеси уравнение относительно полного потока в (5) решается аналитически, что позволяет получить величину

коэффициента деления потока ( $\theta = \frac{P}{F}$ ):

$$\theta = \frac{\chi}{\alpha}(1 - \gamma). \quad (6)$$

Уравнение (6) накладывает ограничение на набор параметров мембранного модуля и его рабочего режима, а именно:

$$\chi < \frac{\alpha}{1 - \gamma}. \quad (7)$$

Данное требование является следствием того, что только часть потока питания проходит через мембрану, обогащаясь высокопроницающей примесью.

При этом, если подать слишком маленький поток питания или сделать слишком большую площадь мембраны модуля, либо данный режим (заданные значения  $P_h$  и  $P_l$  не могут поддерживаться при столь малом значении потока питания) не будет реализовываться, либо не будет выполнено условие малых концентраций примеси ( $c' \ll 1$ ).

Из уравнения (6) можно получить характерное значение коэффициента деления потока (при  $\chi = 1$ ):

$$\theta = \theta_{x1} = \frac{1-\gamma}{\alpha}. \tag{8}$$

Если же рассмотреть случай  $\chi \ll 1$ , или, что то же самое,  $\theta \ll 1$ , то концентрация примеси в потоках модуля меняется слабо, и решением (4) является следующее:

$$C_P^{\max} = C_F \frac{\alpha}{1 + \alpha\gamma - \gamma}. \tag{9}$$

Концентрация примеси, вычисленная по формуле (9), – предельная концентрация, которую можно получить в мембранном модуле при отличных от нуля значениях коэффициента деления потока. При этом если бы концентрация (9) сохранялась с увеличением  $\theta$ , то, достигнув значения

$$\theta = \theta_{x2} = \frac{1 + \alpha\gamma - \gamma}{\alpha}, \tag{10}$$

вся удаляемая примесь была бы в потоке пермеата, а в ретентате содержалась полностью очищенная смесь ( $C_R = 0$ ). Величина коэффициента деления потока  $\theta_{x2}$ , так же как и  $\theta_{x1}$ , является характерной величиной, при которой достигается значимое разделение газовой смеси ( $C_R, C_P$  существенно отличаются от  $C_F$ ).

В рамках решения (5), считая параметры рабочего режима и потока питания заданными, расчетными параметрами являются  $C_R, C_P$  и  $\theta$ , которые однозначно определяют разделение в мембранном модуле. Взаимная зависимость между этими параметрами устанавливается балансом примеси в модуле

$$C_F = \theta C_P + (1 - \theta) C_R.$$

С учетом того, что коэффициент деления потока можно определить аналитически, в соответствии с формулой (6), для решения необходимо найти одну из концентраций — в потоке пермеата или ретентата.

Уравнения (5) могут быть решены методами численного интегрирования с использованием конечных разностей. Трудность здесь состоит в том, что условия по параметрам потоков даны в разных сечениях ( $x=0$  и  $x=1$ ), что требует использования различного рода итерационных процедур при решении задачи и специально создаваемого программного обеспечения.

Для разработки аналитической методики была проведена серия расчетов разделения двухкомпонентной

газовой смеси по уравнениям (2)–(4) с заданной входной концентрацией ( $C_F=0,001$  или  $C_F=0,00001$ ), при условиях варьирования параметров процесса в следующих диапазонах:  $\chi = 0,01 \dots 50$ ;  $\alpha = 5 \dots 200$ ;  $\gamma = 0 \dots 0,3$ . Из рассмотрения исключены режимы, не удовлетворяющие условиям (7). По результатам расчетов установлено, что для данных  $C_F$  и используемых диапазонов для параметров приближение малых концентраций оказывается справедливым для всей расчетной (например, концентрация  $C_P$  составляет не более нескольких процентов), величина коэффициента деления потока близка к расчетной по формуле (6). Далее полученные зависимости исследованы в различных координатах, в которых в качестве задаваемого параметра используются различные функции от  $\chi$  (данный параметр изменяется с варьированием площади мембраны и входного потока), а в качестве определяемого — различные функции  $C_P$  и  $C_R$ .

Цель исследования зависимостей заключалась в поиске наиболее простого и точного способа аналитического представления результатов расчетов. После рассмотрения десятков способов представления входных и выходных данных, в итоге, наилучшие результаты показали зависимости вида

$$\beta = \ln \left( \frac{C_P}{C_R \kappa} \right) = f \left( \frac{\theta}{\theta_x} \right), \tag{11}$$

где  $\kappa = \frac{\alpha}{1 + \alpha\gamma - \gamma} = \frac{C_P^{\max}}{C_F}$  — фактор разделения при малых  $\theta$ ;  $\theta_x = 0,5(\theta_{x1} + \theta_{x2})$  — характерное значение  $\theta$ , определяемое как среднее арифметическое, рассчитанное по уравнениям (8) и (10).

Некоторые из рассчитанных зависимостей, а также их аппроксимации функциями вида

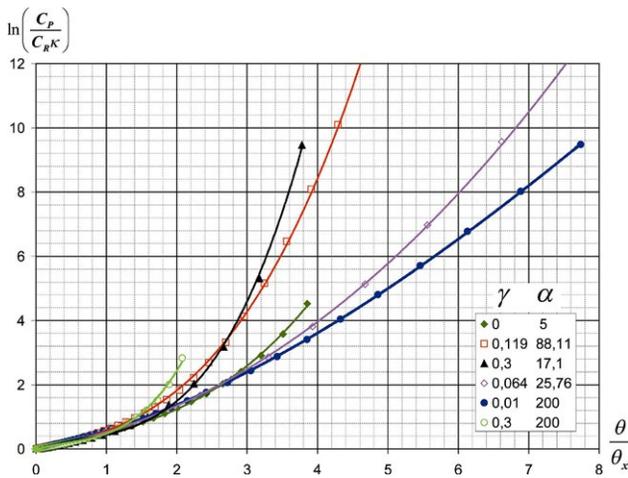
$$\beta = A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon \tag{12}$$

представлены на рис. 2. В (12)  $\varepsilon = \frac{\theta}{\theta_x}$ ,  $A, B, C$  — параметры аппроксимации.

Графики на рис. 2 демонстрируют следующее: функции (10) возрастают монотонно, и при небольших значениях коэффициентов деления потока между ними графики имеют схожий характер. Начиная с  $\frac{\theta}{\theta_x} = 1$ ,

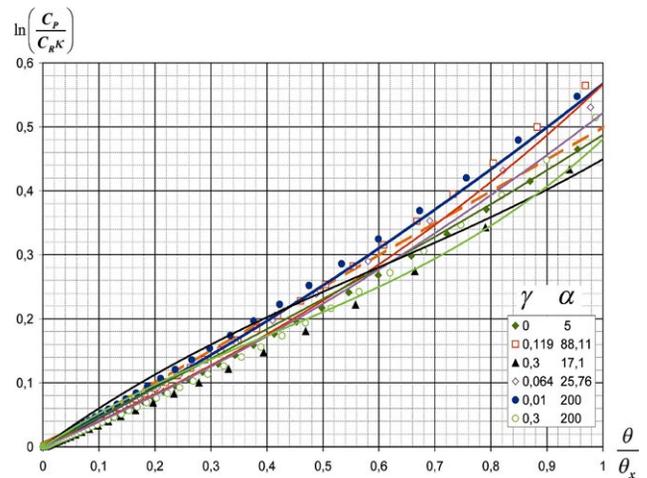
зависимости расходятся друг относительно друга, продолжая возрастать без явно выраженных особенностей. При этом для режимов, соответствующих значительной

очистке ( $\frac{\theta}{\theta_x} > 2$ ), зависимости довольно точно описываются аппроксимациями (11). При малых



**Рис. 2.** Графики зависимости  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right)$  от  $\frac{\theta}{\theta_x}$  при различных значениях  $\gamma$  и  $\alpha$ . Точками отмечены результаты расчетов по (2)–(4), а линиями — аппроксимации

**Fig. 2.** Plots of the dependence of  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right)$  on  $\frac{\theta}{\theta_x}$  for various values of  $\gamma$  and  $\alpha$ . The dots show calculation results according to (2)–(4), and lines show approximations.



**Рис. 3.** Графики зависимости  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right)$  от  $\frac{\theta}{\theta_x} \leq 1$  при различных значениях  $\gamma$  и  $\alpha$ . Точками обозначены результаты расчетов по (2)–(4), сплошными линиями – аппроксимации

полиномами (12), пунктиром —  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right) = 0,5 \frac{\theta}{\theta_x}$ .

**Fig. 3.** Plots of the dependence of  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right)$  on  $\frac{\theta}{\theta_x} \leq 1$  for various values of  $\gamma$  and  $\alpha$ . The dots show the results of calculations according to equations (2)–(4), the solid lines show approximations by polynomials (12), the dotted line shows the results of calculations according to equation  $\ln\left(\frac{C_p}{C_{R\kappa}}\right) = 0,5 \frac{\theta}{\theta_x}$ .

коэффициентах деления потока  $\frac{\theta}{\theta_x} < 1$  наблюдаются отклонения расчетных зависимостей от аппроксимационных, но сами зависимости близки друг к другу, и в рамках точности на уровне  $0,2 \frac{\theta}{\theta_x}$  вместо полиномов (11) относительно неплохо описываются общей прямой  $\beta = 0,5\varepsilon$  (рис. 3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты поиска параметров аппроксимаций (11) при различных значениях  $\alpha$  и  $\gamma$  на всем диапазоне  $\frac{\theta}{\theta_x}$  представлены в таблице 1.

Данные таблицы показывают, что параметры аппроксимации довольно сильно меняются от точки к точке, что затрудняет поиск аналитических зависимостей между ними и  $\alpha$ ,  $\gamma$ . Также, при расчете разделения могут получиться значительные ошибки соответствующих промежуточным значениям  $\alpha$ ,  $\gamma$ , если проводить расчет параметров А, В, С интерполяцией

данных таблицы. Вместо этого представляется целесообразным проводить интерполяцию по результату расчета разделения: для этого производится расчет по (12) в четырех точках, содержащихся в таблице, вблизи той, в которой предстоит определить разделение смеси. После этого последовательной линейной интерполяцией по  $\alpha$  и  $\gamma$  определяется искомое значение (рис. 4). При этом в качестве параметра интерполяции величину  $\gamma$  лучше брать только при малых его значениях (например, меньших 0,01), а при больших — его обратную величину  $\frac{1}{\gamma}$ .

В качестве примера применения разработанной методики примем осушку воздуха. Процесс осушки рассмотрим в модуле с мембраной ПВТМС (поливинилтриметилсилана), имеющей следующие величины проницаемости [6] (принимая, что проницаемости даны при 0 °С):

$$Q(\text{H}_2\text{O}) = 20 \text{ нм}^3/(\text{м}^2\text{ч}\cdot\text{атм});$$

$$Q(\text{N}_2) = 0,12 \text{ нм}^3/(\text{м}^2\text{ч}\cdot\text{атм});$$

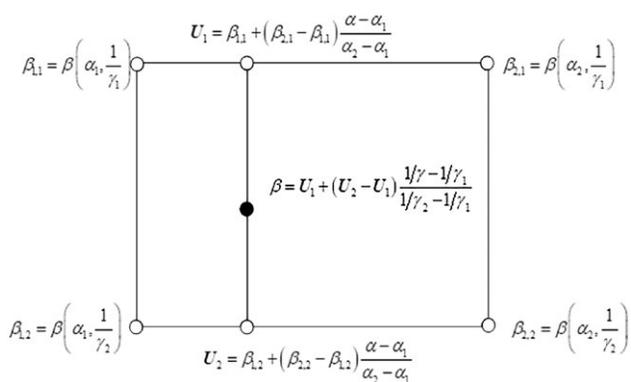
$$Q(\text{O}_2) = 0,45 \text{ нм}^3/(\text{м}^2\text{ч}\cdot\text{атм}).$$

**Таблица 1.** Параметры аппроксимации A, B, C при различных значениях  $\alpha$  и  $\gamma$

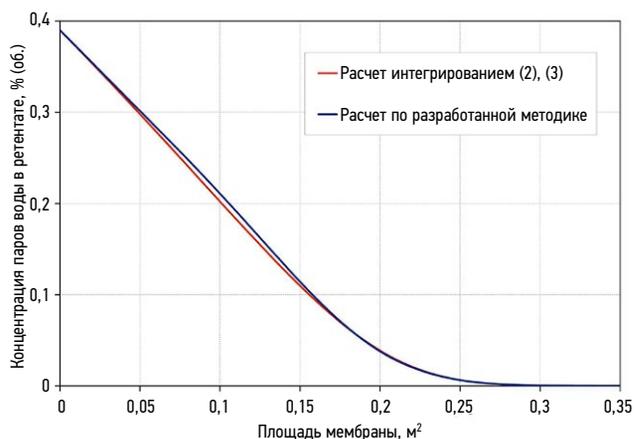
**Table 1.** Approximation parameters A, B, C for different values of  $\alpha$  and  $\gamma$

$\alpha$	$\gamma$	A	B	B
5	0	0,03086	0,05432	0,40248
5	0,01	0,0561	-0,02855	0,45716
5	0,034	0,0554	-0,0062	0,4264
5	0,119	0,1019	-0,1054	0,4571
5	0,3	0,1587	-0,151	0,3783
17,1	0	0,0013	0,05729	0,46646
17,1	0,01	0,00238	0,05983	0,46967
17,1	0,034	0,0042	0,0816	0,4363
17,1	0,119	0,0306	0,0658	0,4333
17,1	0,3	0,2445	-0,4368	0,6416
38,82	0	-0,00131	0,05569	0,4673
38,82	0,01	-0,00174	0,07625	0,45464
38,82	0,034	-0,00206	0,12784	0,39764
38,82	0,119	0,02475	0,18271	0,32823
38,82	0,3	0,3612	-0,63438	0,72243
88,11	0	-0,00105	0,04292	0,49042
88,11	0,01	-0,00257	0,08935	0,45729
88,11	0,034	0,00069	0,15829	0,39345
88,11	0,119	0,0839	0,0935	0,3889
88,11	0,3	0,2986	-0,3135	0,5001
200	0	-0,0016	0,04506	0,49775
200	0,01	-0,00373	0,13055	0,44004
200	0,034	0,01097	0,22237	0,33757
200	0,119	0,29094	-0,40153	0,68303
200	0,3	0,29062	-0,24875	0,46451

В потоке высокого давления примем давление равным 6 ата, в потоке низкого — 1 ата. Влажность воздуха в потоке питания примем соответствующей насыщенности при температуре +20 °С. В итоге входная смесь (считаем ее трехкомпонентной) представляет собой: H<sub>2</sub>O — 0,39; O<sub>2</sub> — 20,86; N<sub>2</sub> — 78,75% (об.). Средняя проницаемость мембраны по кислороду и азоту с учетом их концентраций составляет: 0,189 нм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч\*атм). Поток питания примем равным 1 нм<sup>3</sup>/ч и рассмотрим, как изменяется концентрация паров воды в потоке ретентата в зависимости от площади мембраны. Результаты расчетов численным решением (2)–(4) и с помощью разработанной методики для данного случая представлены на рис. 5.



**Рис. 4.** Схема интерполяции результатов.  
**Fig. 4.** Schematic diagram of the interpolation results.



**Рис. 5.** График зависимости концентрации паров на выходе противоточного мембранного модуля на основе ПВТМС в зависимости от площади мембраны. В потоке высокого (6 ата) и низкого (1 ата) давления осушаемая смесь воздух потоком 1 нм<sup>3</sup>/ч. Расчет в приближении бинарной смеси.

**Fig. 5.** Plot showing the variation of the vapor concentration at the outlet of the countercurrent membrane module based on a polyvinyltrimethylsilane membrane as a function of the membrane area. The dried mixture is air flow of 1 нм<sup>3</sup>/h in a high (6 ата) and low (1 ата) pressure flow. Calculation in the binary mixture approximation.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Финансирование.** Работа не имела стороннего финансирования.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с подготовкой и публикацией статьи.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Funding source.** This publication was not supported by any external sources of funding.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмельник М.Г., Ваджинский Д.Н., Жихарева Н.В. Современные технологии осушения воздуха // Холодильная техника та технологія. 2014. № 3(149). С. 15–21.
2. Соловьев С.А., Поляков А.М. Перспективы применения процессов мембранного газоразделения для подготовки и переработки природного и попутного газов. Ч. 2 // Мембраны. 2006. № 4(32). С. 3–18.
3. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: пер. с англ. М.: Мир, 1999.
4. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения: пер. с англ. М.: Химия, 1981.
5. Faizan A., Lau K.K., Shariff A.M. Ghulam Murshid. Process simulation and optimal design of membrane separation system for CO<sub>2</sub> capture from natural gas // Computers and Chemical Engineering. 2012. N 36. P. 119–128.
6. Амосова О.Л., Малых О.В., Тепляков В.В. Мембранно-адсорбционные методы выделения водорода из многокомпонентных газовых смесей биотехнологии и нефтехимии // Мембраны. 2008. № 2(38). С. 26–39.

## REFERENCES

1. Hmel'nik MG, Vadzinskij DN, Zihareva NV. Sovremennye tehnologii osusheniya vozduha. *Holodil'na tehnika ta tehnologija*. 2014(149):15–21. (In Russ).
2. Solov'ev SA, Poljakov AM. Perspektivy primeneniya processov membrannogo gazorazdelenija dlja podgotovki i pererabotki prirodnogo i poputnogo gazov. Chast' 2. *Membrany*. 2006;32:3–18. (In Russ).
3. Mulder M. *Vvedenie v membrannuju tehnologiju*. Moscow: Mir; 1999. (In Russ).
4. Hvang S-T, Kammermejer K. *Membrannye processy razdelenija*. Moscow: Himija; 1981. (In Russ).
5. Faizan A, Lau KK, Shariff AM. Ghulam Murshid. Process simulation and optimal design of membrane separation system for CO<sub>2</sub> capture from natural gas. *Computers and Chemical Engineering*. 2012;36:119–128.
6. Amosova OL, Malyh OV, Tepljakov VV. Membranno-adsorbcionnye metody vydelenija vodoroda iz mnogokomponentnyh gazovyh smesey biotehnologii i neftehimii. *Membrany*. 2008;38:26–39. (In Russ).

## ОБ АВТОРЕ

**Окунев Александр Юрьевич,**

доцент, к.ф.-м.н.;

адрес: Российская Федерация, 105064,

Москва, ул. Казакова, д. 15;

eLibrary SPIN: 7051-2374;

e-mail: okunevay@gmail.com

## AUTHOR'S INFO

**Alexandr Yu. Okunev,**

Assistant professor, Cand. Sc. (Phys.-Math.);

address: 15 Kazakova street, 105064 Moscow,

Russian Federation;

eLibrary SPIN: 7051-2374;

e-mail: okunevay@gmail.com