

# Разработка математической модели молекулярно-селективного переноса газа в гибридном мембранно-адсорбционном концентраторе кислорода

А.А. Тишин<sup>1</sup>, В.Н. Гуркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», САЕ ИНТЭЛ, Каширское шоссе 31, Москва, Россия, 115409

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Миусская площадь 9, Москва, Россия, 125047

**Аннотация.** Большинство современных концентраторов кислорода используют технологию сорбционного разделения воздуха. Разработка гибридной мембранно-сорбционной технологии разделения способна повысить энергоэффективность процесса. В работе рассмотрена математическая модель молекулярно-селективного переноса газа в гибридном концентраторе кислорода, состоящем из адсорбционного и мембранного блоков объединенных в циркуляционный контур. В основе рассмотренной гибридной модели использована модель равновесной изотермической сорбции с линейными изотермами без продольного перемешивания для численного расчета адсорбционного блока системы и модель идеального вытеснения в полости высокого давления с перпендикулярным оттоком в полости низкого давления для расчета мембранного блока системы. В результате исследования получена высокая адекватность модели с экспериментом в диапазоне концентраций кислорода до 90%, проведено сравнение с ранее полученными результатами. Предложена новая модель способная учитывать стадии уравнивания и противоточной продувки.

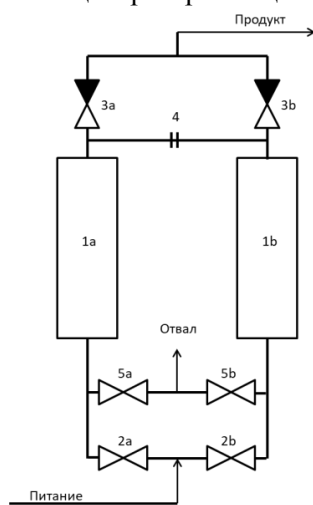
## 1. Введение

В настоящее время разработке гибридной технологии разделения газов на основе мембранной и адсорбционной технологий уделяется значительное внимание [1–4]. Впервые гибридная мембранно-адсорбционная технология была применена в начале 21 века для выделения водорода, гелия и углекислого газа из газовых смесей нефтехимии и биотехнологии [1,5]. В дальнейшем были разработаны методы для разделения многокомпонентных газовых смесей содержащих данные газы [6]. Помимо применения в нефтехимии гибридные технологии разделения имеют большие перспективы в разделении воздуха на компоненты [7].

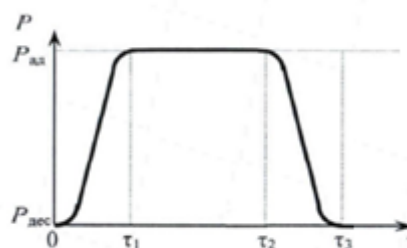
Современное состояние воздухоразделительной промышленности выделяет три основных метода получения компонентов воздуха: мембранный, адсорбционный и криогенный [8]. Каждый из методов имеет свою область применения, для наработки больших объемов чистых и особочистых компонентов используется криогенный метод, позволяющий получить значительные объемы продуктов разделения воздуха в жидком виде. Для наработки средних объемов кислорода (от 15 до 1000 м<sup>3</sup>/ч [8]) и азота используется адсорбционный метод разделения, имеющий низкие капитальные и эксплуатационные затраты. Для получения

небольших объемов азота высокой чистоты и кислорода средних концентраций (до 50%) используется мембранный метод, являющийся наиболее компактным и мобильным методом [9,10].

На основе гибридных технологий в настоящее время активно разрабатываются и исследуются концентраторы кислорода. Современные концентраторы кислорода, чаще всего, работают по мембранной или адсорбционной технологии разделения воздуха. Первая используется в портативных и компактных концентраторах, применяемых чаще всего при реабилитации вне стационаров, из-за невысокой чистоты получаемого кислорода (35 %). На основе второй разработано множество концентраторов и систем, пригодных для получения кислорода из воздуха [11,12]. Адсорбционная технология разделения воздуха позволяет достичь чистоты кислорода до 93 % [13]. В основе адсорбционного метода лежит PSA (pressure swing adsorption) схема Скарстрёма [14], представленная на рисунке 1, состоящая из двух адсорберов циклически проходящих стадии заполнения, адсорбции и десорбции (рисунок 2). Современные кислородные концентраторы чаще всего имеют три и более адсорберов [13].



**Рисунок 1.** Схема адсорбционной установки для разделения воздуха методом Скарстрёма [14].



**Рисунок 2.** Циклограмма работы адсорберов концентратора кислорода по схеме заполнения, вытеснение, десорбция.

Разрабатываемая технология разделения воздуха мембранно-адсорбционным методом включает два блока, адсорбционный и мембранный. Использование двух методов разделения позволяет добиться повышения энергоэффективности разделения воздуха, за счет нивелирования недостатков каждого из методов достоинствами второго метода. Поскольку современные адсорбционные системы являются технически сложными устройствами, для разработки и проектировки гибридной системы, включающей в свой состав адсорбционную часть, необходимо провести численный расчет системы для определения основных рабочих характеристик адсорбционного блока. Для этого необходимо разработать математическую модель молекулярно-селективного переноса газа в гибридной мембранно-адсорбционной системе.

## 2. Теоретический анализ

Для расчета адсорбционной ступни системы предполагается использовать математическую модель равновесной изотермической сорбции с линейными изотермами без продольного перемешивания [2]. В рамках используемой математической модели будем предполагать следующее [15]: 1) изотермы носят линейный характер без гистерезиса, нелинейные эффекты отсутствуют (объемная сорбция), адсорбционная ветвь совпадает с десорбционной; 2) адсорбция и десорбция проходят быстро, их длительностями можно пренебречь; 3) давление и

температура газа в адсорбере, температура адсорбента, а также концентрация азота в газовой фазе и твердой фазах изменяются только в продольном направлении адсорбера; 4) объем адсорбента состоит из элементарных слоев, внутри которых концентрация азота и кислорода и температура постоянны; 5) газообразный азот и кислород обладают свойствами идеальных газов; 6) компоненты сорбируются независимо друг от друга, с вероятностями пропорциональными константам Генри; 7) адсорбция протекает с образованием острого стационарного фронта.

### 2.1. Модель адсорбционного блока системы

Рассмотрим в качестве адсорбционного блока концентратора кислорода схему [14], с циклограммой (рисунок 2) состоящей из стадий заполнения, вытеснения и сброса. В первый момент времени в адсорбере происходит десорбция путем снижения давления от давления адсорбции  $P_{ads}$  до давления десорбции  $P_{des}$ . По достижению давления десорбции в адсорбере начинается заполнение потоком, подаваемым на вход с компрессора. Для концентратора кислорода, поток питания – атмосферный воздух, можно рассмотреть как бинарную смесь азота и кислорода, поскольку свойства аргона, находящегося в воздухе в незначительных количествах близки к свойствам кислорода [16]. Таким образом, на вход адсорбционного блока подается воздух с молярными концентрациями компонентов потока питания  $C_{Fi}^{psa}$  (1 – кислород, 2 – азот). При достижении в адсорбере давления адсорбции, начинается стадия продуцирования – газ, обогащенный по кислороду, вытесняется из адсорбера с помощью потока питания при постоянном давлении. Протекающие в адсорберах процессы на каждой стадии работы циклограммы можно представить следующим образом.

**Десорбция.** В начальный момент времени адсорбер заполнен смесью питания под давлением адсорбции  $p_{ads}$ . Конечное состояние адсорбера – сброс смеси до давления десорбции  $p_{des}$  во внешний объем. Представим газосодержание адсорбера в виде [15]:

$$k_i = \varepsilon + \sigma_i(1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – пористость адсорбера,  $\sigma_i$  – постоянные линейной изотермы адсорбции (Генри).

Тогда материальный баланс вещества в адсорбере на стадии десорбции и баланс молярных концентраций в равновесии с внешним объемом примут вид [2]:

$$k_i C_{Fi}^p V = k_i C_{Wi}^p V + C_{Wi}^p W_p, \quad (2)$$

$$\frac{C_{F1}^p + C_{F2}^p}{C_{W1}^p + C_{W2}^p} = \frac{p_{ads}}{p_{des}}. \quad (3)$$

Воспользовавшись уравнениями (2) и (3) легко получить значения концентраций компонентов газа ( $C_{Wi}^p$ ) в конце стадии десорбции и поток вышедшего в процессе газа ( $W_p$ ).

**Заполнение.** Заполнение осуществляется потоком питания  $F_p'$  с компрессора от давления  $p_{des}$  до давления  $p_{ads}$ , тогда материальный баланс вещества на стадии и соотношение концентраций выглядит следующим образом:

$$k_i C_{Wi}^p V + C_{Fi}^p F_p' = k_i C_{Pi}^p V, \quad (4)$$

$$\frac{C_{W1}^p + C_{W2}^p}{C_{P1}^p + C_{P2}^p} = \frac{p_{des}}{p_{ads}}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) позволяют рассчитать значения концентраций компонентов в конце стадии заполнения ( $C_{Pi}^p$ ) и часть потока питания адсорбционного блока идущую на заполнение адсорбера ( $F_p'$ ).

**Вытеснение.** Стадия вытеснения проходит при постоянном давлении адсорбции  $p_{ads}$ . Для концентраций справедливо равенство:

$$C_{P1}^p + C_{P2}^p = C_{F1}^p + C_{F2}^p. \quad (6)$$

Материальный баланс вошедшего и вышедшего из адсорбера вещества можно представить в виде:

$$k_i C_{Pi}^p V + C_{Fi}^p F_p'' = C_{Pi}^p P_p + k_i C_{Fi}^p V. \quad (7)$$

Вытеснение происходит потоком компрессора  $F_p''$ , подаваемым на вход адсорбера, при этом на выходе адсорбера происходит продуцирование целевого потока  $P_p$ , с концентрациями компонентов  $C_{P1}^p$  и  $C_{P2}^p$ . Полный поток питания адсорбционного блока системы определяется как сумма потоков подаваемых на стадии заполнения и вытеснения:

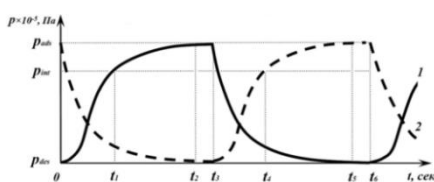
$$F_p = F_p'' + F_p' \tag{8}$$

Система уравнений (1) – (8) позволяет полностью рассчитать адсорбционный блок гибридной мембранно-адсорбционной системы и определить эффективность ее энергопотребления определяемую как величину относительного отбора ( $\psi_p$ ) и степень извлечения ( $\varphi$ ):

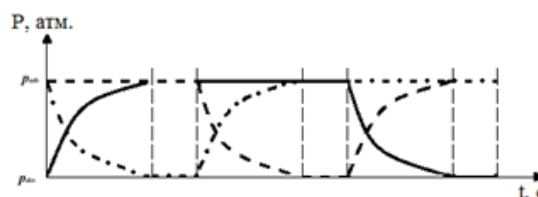
$$\psi_p = \frac{P_p}{F_p} \tag{9}$$

$$\varphi = 1 - \frac{x_{W1}^p W_p}{x_{F1}^p F_p} \tag{10}$$

В работах [2,15] рассмотрена гибридная система для разделения воздуха с использованием рециркуляции и двух стадийного заполнения с дозаполнением. Циклограмма процесса включает следующие стадии (рис. 3): десорбцию, первоначальное заполнение, дозаполнение и вытеснение. Особенностью данной схемы является использование части продуктового потока адсорбционного блока для первоначального заполнения адсорбера ( $G_p$ ) до промежуточного давления  $p_{int}$ . Альтернативным вариантом организации первоначального заполнения является использование части потока ретентата мембранного блока системы ( $G_m$ ).



**Рисунок 3.** Циклограмма адсорбционного блока: десорбция, первоначальное заполнение, дозаполнение, вытеснение [15].



**Рисунок 4.** Циклограмма: заполнение уравниванием, дозаполнение, вытеснение, сброс уравниванием, сброс в атмосферу, противоточная продувка [4].

Материальный баланс стадии первоначального заполнения с использованием части продуктового потока:

$$k_i C_{Wi}^p V + C_{Pi}^p G_p = k_i C_{Ni}^p V, \tag{11}$$

$$\frac{C_{W1}^p + C_{W2}^p}{C_{N1}^p + C_{N2}^p} = \frac{p_{des}}{p_{int}}, \tag{12}$$

где  $C_{Ni}^p$  – концентрации компонентов после первоначального заполнения адсорберов до промежуточного давления  $p_{int}$  потоком продукта адсорбционного блока  $G_p$ .

Совокупность уравнений (1) – (12) дает возможность рассчитать гибридную систему [15] с учетом перепуска продуктового потока системы и позволяет достичь больших концентраций продуктового потока, чем система Скарстрёма [14].

Наиболее перспективными для введения дополнительными стадиями работы циклограммы адсорбционного блока системы являются противоточная продувка и стадия уравнивания [7]. Циклограмма работы адсорбционного блока гибридной системы примет вид [4], представленный на рисунке 4 и состоит из стадий: сброса уравниванием, сброса в атмосферу, регенерации противоточной продувкой, заполнения уравниванием, дозаполнения потоком питания, вытеснения. Тогда процессы протекающие внутри адсорберов на стадии уравнивания можно описать следующими уравнениями:

$$k_i C_{Fi}^p V = k_i C_{Gi}^p V + C_{Gi}^p G_p, \tag{13}$$

$$\frac{C_{F1}^p + C_{F2}^p}{C_{G1}^p + C_{G2}^p} = \frac{p_{ads}}{p_{int}}, \quad (14)$$

$$k_i C_{Ni}^p V + C_{Gi}^p G_p = k_i C_{Gi}^p V, \quad (15)$$

$$\frac{C_{N1}^p + C_{N2}^p}{C_{G1}^p + C_{G2}^p} = \frac{p_{des}}{p_{int}}. \quad (16)$$

Давление  $p_{int}$  является равновесным давлением, достигаемым в адсорбере, проходящем стадию сброса уравниванием от давления  $p_{ads}$  уравнения (13), (14), и давлением в адсорбере, проходящем стадию заполнения уравниванием от давления  $p_{des}$  уравнения (15), (16). Поток  $G_p$  соответствует потоку газа, перешедшему из одного адсорбера в другой, а концентрации  $C_{Gi}^p$  установившимся равновесным концентрациям. Начальная концентрация компонентов на стадии уравнивания  $C_{Ni}^p$  в уравнениях (15), (16) соответствует концентрации полученной в результате противоточной продувки описываемой следующими уравнениями:

$$k_i C_{Wi}^p V + C_{Pi}^p P_p = C_{Wi}^p W_p + k_i C_{Pi}^p V, \quad (17)$$

$$C_{W1}^p + C_{W2}^p = C_{P1}^p + C_{P2}^p, \quad (18)$$

где противоточная продувка осуществляется частью потока продукта  $P_p^p$  адсорбционного блока системы, а поток  $W_p^p$  сбрасывается в атмосферу.

Система уравнений (1)-(8), (13)-(18) позволяет полностью рассчитать адсорбционный блок гибридного концентратора кислорода. При этом по аналогии с первоначальным заполнением адсорбера частью потока ретентата мембранного блока, предложенным в работе [15], противоточную продувку также можно осуществить потоком ретентата мембранного блока.

### 2.2. Модель мембранного блока системы

Для расчета мембранного блока воспользуемся уравнениями описывающими разделение газовой смеси с перпендикулярным оттоком в полости низкого давления и предположением идеального вытеснения в полости высокого давления [2]:

$$\frac{dZ_i}{ds} = Q_i \left( x_{hi}^m - \frac{p_l}{p_h} x_{li}^m \right), 0 \leq s \leq S \quad (19)$$

$$x_{hi}^m = \frac{Z_i}{q_{hi}}, \quad (20)$$

$$q_{hi} = \sum_{j=1}^2 Z_j, \quad (21)$$

$$x_{li}^m = \frac{Q_i \left( x_{hi}^m - \frac{p_l}{p_h} x_{li}^m \right)}{\sum_{j=1}^2 Q_j \left( x_{hj}^m - \frac{p_l}{p_h} x_{lj}^m \right)}. \quad (22)$$

Граничные условия для интегрирования по длине модуля:

$$Z_i(0) = F_m x_{Fi}^m. \quad (23)$$

Проинтегрировав уравнение (19), можно получить концентрации в потоке ретентата  $x_{Ri}^m$  и коэффициент деления потока  $\theta$ , необходимый для определения пермеата  $P_m$  и ретентата  $R_m$  мембранного блока:

$$P_m = \theta F_m, \quad (24)$$

$$R_m = (1 - \theta) F_m, \quad (25)$$

Таким образом, воспользовавшись уравнениями (1)-(8), (11)-(25) с учетом упрощений и приближений можно провести численный расчет мембранно-адсорбционного концентратора кислорода, пригодный для проектировки концентратора.

### 3. Результаты численного моделирования

Апробация математической модели проводилась в два этапа, на первом этапе был проведен расчет адсорбционного блока системы с различными вариантами работы циклограммы. На

втором этапе была рассчитана работа гибридной мембранно-адсорбционной системы и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Для перевода молярных концентраций в мольные доли и потоков в мольные потоки используем формулы:

$$C = \frac{xp}{RT} \tag{26}$$

$$Y_F = F_p \frac{p_{ads}}{RT}, \tag{27}$$

где R – универсальная газовая постоянная, а T – температура процесса.

В таблице 1 представлены характеристики адсорбционного блока гибридного концентратора кислорода работающего по циклограмме Скарстрёма [14] в зависимости от давления  $p_{ads}$  для различных давлений  $p_{des}$ . В качестве начальных условий для расчета процесса задаются следующие параметры:  $p_{ads}$ ,  $p_{des}$ ,  $V$ ,  $C_{F1}^p$ ,  $C_{F2}^p$ ,  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon$ .

**Таблица 1.** Зависимость потоков и концентраций кислорода в них для адсорбционного блока [14] системы от давления адсорбции  $p_{ads}$  для различных давлений десорбции  $p_{des}$ .

$p_{ads}$ , атм	$p_{des}$ , атм	$Y_F$ , моль/с	$Y_P$ , моль/с	$\psi_p$	$\varphi$	$x_{P1}^p$ , мол.д.	$x_{W1}^p$ , мол.д.
6	0,1	4,68	1,747	0,373	0,725	0,408	0,092
	1	4,198		0,416	0,716	0,361	0,102
	2	3,671		0,476	0,711	0,314	0,116
	3	3,157		0,553	0,718	0,273	0,132
	4	2,661		0,656	0,749	0,24	0,153
	5	2,189		0,798	0,828	0,218	0,179
4	0,1	3,102	1,165	0,375	0,724	0,405	0,093
	1	2,622		0,444	0,713	0,337	0,109
	2	2,105		0,553	0,718	0,273	0,132
	3	1,615		0,721	0,781	0,227	0,165
2	0,1	1,524	0,582	0,382	0,722	0,397	0,094
	1	1,052		0,553	0,718	0,273	0,132
1	0,1	0,735	0,291	0,396	0,719	0,381	0,098

Из таблицы 1 видно, что регенерация сорбента при атмосферном давлении путем снижения давления с  $p_{ads}$  до  $p_{des}$  недостаточна для получения концентраций кислорода выше 36 %, что значительно ограничивает ее применимость и согласуется с теорией [13].

В таблице 2 представлены характеристики адсорбционного блока работающего по циклограмме [15], при давлении  $p_{ads}$  = 6 атм в зависимости от давления десорбции  $p_{des}$  для различных давлений  $p_{int}$ .

При использовании комбинированного заполнения концентрация кислорода в питании  $x_{P1}^p$  растет с ростом давления дозаполнения  $p_{int}$ , при этом относительный отбор  $\psi_p$  и коэффициент извлечения  $\varphi$  уменьшаются.

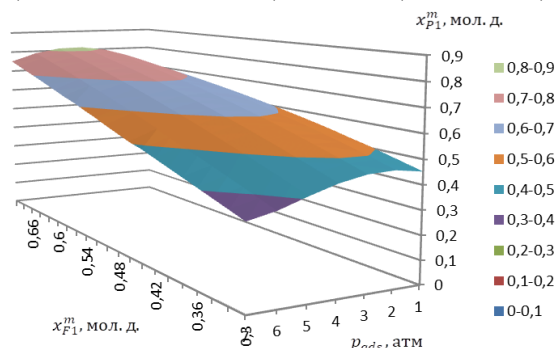
На рисунке 5 представлена зависимость концентрации кислорода в продуктивном потоке гибридной мембранно-адсорбционной системы от давления продуктового потока и концентрации кислорода в потоке, выходящем из адсорбционного блока, полученная в результате расчета.

Видно, что с ростом концентрации кислорода в потоке продукта адсорбционного блока эффективность работы мембраны уменьшается при большом перепаде давления, и незначительно увеличивается при малом перепаде. Максимальный прирост концентрации на мембранном блоке системы, около 17 %, наблюдается при давлениях 2 – 3 атм и концентрации кислорода в потоке питания блока 30 – 36 %. Более точных результатов можно добиться

используя другие модели разделения на мембранном модуле, однако сравнивая полученные данные с результатами расчета адсорбционного блока в предположениях [15] и экспериментальными данными полученными ранее [7], видно что отклонения составляют не более 5 %.

**Таблица 2.** Зависимость потоков и концентраций кислорода в них для адсорбционного блока [15] системы от давления десорбции  $p_{des}$  для различных давлений  $p_{int}$  при  $p_{ads} = 6$  атм.

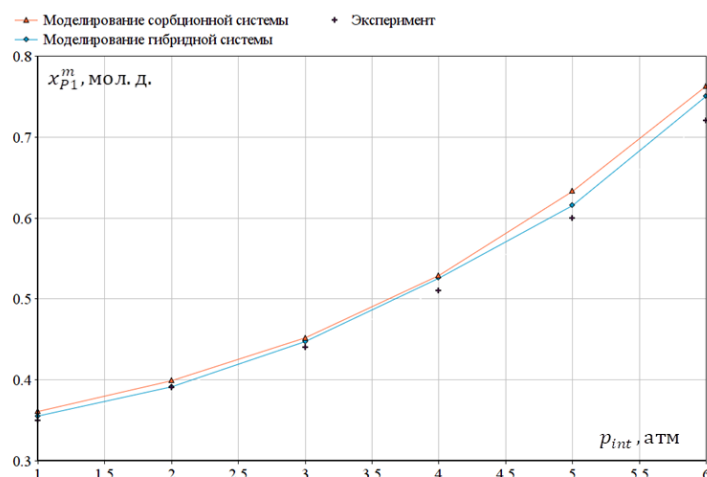
$p_{des}$ , атм	$p_{int}$ , атм	$Y_F$ , моль/с	$Y_P$ , моль/с	$Y_G$ , моль/с	$\psi_p$	$\varphi$	$x_{P1}^p$ , МОЛ.Д.	$x_{W1}^p$ , МОЛ.Д.
1	1	4,198		0	0,416	0,716	0,361	
	2	3,852		0,115	0,424	0,69	0,399	
	3	3,541		0,328	0,401	0,663	0,452	
	4	3,279		0,612	0,346	0,636	0,529	0,102
	5	3,076		0,935	0,264	0,612	0,633	
	6	2,929		1,269	0,163	0,593	0,763	
2	2	3,671	1,747	0	0,476	0,711	0,314	
	3	3,304		0,183	0,473	0,679	0,341	
	4	2,969		0,468	0,431	0,643	0,384	0,116
	5	2,683		0,823	0,344	0,605	0,449	
	6	2,465		1,206	0,219	0,57	0,546	
	4	4	2,661		0	0,656	0,749	0,24
5		2,255		0,338	0,625	0,704	0,249	0,153
6		1,864		0,797	0,509	0,642	0,265	



**Рисунок 5.** Трехмерный график зависимости концентрации кислорода в продуктивном потоке гибридной системы  $x_{P1}^m$  от давления продуктового потока  $p_{ads}$  и концентрации кислорода в потоке питания мембранного блока  $x_{F1}^m$  (численный).

На рисунке 6 представлены зависимости концентраций кислорода в продуктивном потоке системы при различных значениях давления дозаполнения полученные в результате экспериментов [7], численных расчетов по модели предложенной в работе [15] для адсорбционного блока гибридной системы и численного расчета гибридной системы при заполнении адсорберов потоком ретентата мембранного блока.

Таким образом, поскольку расчет, проведенный по модели, построенной на уравнениях (1)-(12), (19)-(25) с циклограммой, состоящей из сброса, первоначального заполнения, дозаполнения и вытеснения, совпадает с экспериментальными данными, полученными при работе гибридной системы с данной циклограммой и имеет отклонение менее 5%, то предложенная модель расчета гибридных систем на основе уравнений (1)-(8), (13)-(25) может быть использован для расчета и проектировки гибридных систем с более сложной циклограммой, включающей стадии уравнивания и противоточной продувки.



**Рисунок 6.** Зависимости концентрации кислорода  $x_{P1}^m$  в продуктовом потоке системы от давления дозаполнения  $p_{int}$  для адсорбционной системы (численный), гибридной системы (численный) и гибридной системы (экспериментальный).

#### 4. Заключение

В работе предложена математическая модель гибридной мембранно-адсорбционной системы, на основе модели равновесной изотермической адсорбции с линейными изотермами без продольного перемешивания для адсорбционного блока системы и модели идеального вытеснения в полости высокого давления с перпендикулярным оттоком в полости низкого давления для мембранного блока системы. Моделирование системы с упрощенной циклограммой работы, состоящей из стадий сброса, первоначального заполнения, дозаполнения и вытеснения, показало свою эффективность и высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований. Отклонение численных данных от экспериментальных данных составило менее 5%. В дальнейшем предложенная модель может быть использована для расчета и проектировки гибридных систем для обогащения воздуха кислородом, работающих по более сложным циклограммам, включающим стадии противоточной продувки и уравнивания.

#### 5. Литература

- [1] Амосова, О.Л. Мембранно-адсорбционные методы выделения водорода из многокомпонентных газовых смесей биотехнологии и нефтехимии / О.Л. Амосова, О.В. малых, В.В. Тепляков – М.: Серия. Критические технологии, 2008. – 26 с.
- [2] Kudinov, A.N. Separation characteristics of an ejector membrane-sorption hybrid system // Theor. Found. Chem. Eng. – Pleiades Publishing. – 2014. – Vol. 48(6) – P. 832-836.
- [3] Tishin, A.A. Investigation of the three-adsorber scheme used in the hybrid membrane-sorption system // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1099. – P. 012030.
- [4] Тишин, А.А. Применение трехадсорберной гибридной мембранно-сорбционной системы для получения воздуха, обогащенного кислородом // Мембраны и Мембранные технологии. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 137-144.
- [5] Amosova, O.L. Integrated membrane/PSA systems for hydrogen recovery from gas mixtures / O.L. Amosova, O.V. Malykh, V.V. Teplyakov // Desalin. Water Treat. Taylor & Francis Group. – 2010. – Vol. 14, № 1-3. – P. 119-126.
- [6] Амосова, О.Л. Гибридные мембранно-адсорбционные методы разделения многокомпонентных газовых смесей нефтехимии и биотехнологии, содержащих  $H_2$  ( $He$ ) и  $CO_2$  // Дис. канд. хим. наук. – Москва, 2011.
- [7] Tishin, A.A. Use of a Hybrid Membrane-Sorption System with Three Adsorbers for Producing Oxygen-Enriched Air // Pet. Chem. – 2018. – Vol. 58, № 4. – P. 338-345.
- [8] Иванова, Е.Н. Адсорбенты для получения кислорода методом короткоциклового



- безнагревной адсорбции // Дис. канд. техн. наук. – Москва, 2016.
- [9] Фролов, Д.М. Моделирование процесса мембранного разделения воздуха в поволоконном модуле / Д.М. Фролов, Г.А. Дибров, Г.Г. Каграманов // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29, № 2. – 161 с.
- [10] Дытнерский, Ю.И. Мембранное разделение газов / Ю.И. Дытнерский, В.П. Брыков, Г.Г. Каграманов. – М: Химия, 1991.
- [11] Norman, R.M. Apparatus and method for supplying oxygen to passengers on board aircraft: pat. US5531807A USA, 1994. – P. 15.
- [12] Batta, L. Preparation of high purity oxygen: pat. US3717974A USA, 1987. – P. 8.
- [13] Глупанов, В.Н. Получение кислорода и азота адсорбционным разделением воздуха. – М: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1991. – 46 с.
- [14] Skarstrom, C.W. Oxygen concentration process: pat. US3237377A USA, 1962. – P. 6.
- [15] Kudinov, A.N. Features of selective mass transfer in hybrid membrane-sorption systems / A.N. Kudinov, I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov // Theor. Found. Chem. Eng. Pleiades Publishing. – 2014. – Vol. 48, № 4. – P. 352-359.
- [16] Иванова, Е.Н. Адсорбенты для разделения газовой смеси кислород-аргон на основе пилларированных монтмориллонитовых глин // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29, № 3(162). – С. 74-76.

## Development of a mathematical model of molecular-selective gas transfer in a hybrid membrane-adsorption oxygen concentrator

A.A. Tishin<sup>1</sup>, V.N. Gurkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe shosse 31, Moscow, Russia, 115409

<sup>2</sup>Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq. 9, Moscow, Russia, 125047

**Abstract.** Most modern oxygen concentrators use sorption air separation technology. The development of a hybrid membrane-sorption separation technology can improve the energy efficiency of the process. The paper considers a mathematical model of molecular-selective gas transfer in a hybrid oxygen concentrator consisting of adsorption and membrane units combined into a circulation loop. The considered hybrid model is based on a model of equilibrium isothermal sorption with linear isotherms without longitudinal mixing for numerical calculation of the adsorption unit of the system and a model of ideal displacement in the high pressure cavity with perpendicular outflow in the low pressure cavity to calculate the system membrane unit. In the course of the study, a high adequacy of the model was obtained with an experiment in the range of oxygen concentrations up to 90%, and a comparison was made with previously obtained results. A new model has been proposed that is able to take into account the equalization and countercurrent blowing stages.