

УДК 533.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОГЛОЩЕНИЯ ГЕЛИЯ МИКРОСФЕРАМИ И КОМПОЗИТНЫМ СОРБЕНТОМ НА ИХ ОСНОВЕ

А. С. Верещагин^{*,**,***}, В. М. Фомин^{*,**,***},
В. Н. Зиновьев^{*}, И. В. Казанин^{*,**}, А. Ю. Пак^{*},
В. А. Лебига^{*,**,***}

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

*** Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия

E-mails: vereshchag@itam.nsc.ru, fomin@itam.nsc.ru, zinoviev@itam.nsc.ru,
kazaniniv@gmail.com, pak@itam.nsc.ru, lebiga@itam.nsc.ru

Разрабатывается математический аппарат для описания сорбции гелия микросферами при их дисперсионном распределении. Выводится аналитическое решение исследуемой задачи и на его основе проводится разложение экспериментальных зависимостей степени поглощения гелия микросферами от времени на гармоники, что позволяет выполнить анализ временных характеристик сорбционного процесса.

Ключевые слова: гелий, природный газ, микросферы, разделение, математическое моделирование, гармоники, обыкновенные дифференциальные уравнения, матричная экспонента.

DOI: 10.15372/PMTF20210306

Введение. Мембранно-сорбционный метод выделения гелия из смесей является новым подходом, предлагаемым авторами данной работы [1–3]. Суть метода заключается в использовании специальных сорбентов, представляющих собой замкнутые микросферические мембраны, избирательно проницаемые для гелия и практически непроницаемые для других газов. Под действием разности парциальных давлений гелия внутри и вне микросфер гелий селективно поглощается ими во внутреннюю полость и может быть извлечен из них путем создания обратного градиента парциального давления [4].

Экспериментальное изучение проницаемости микросфер для гелия проводится с использованием разработанной в [5, 6] методики, аналогичной методике, предложенной в [7]. В емкость, заполненную микросферами или сорбентом на их основе, подается гелий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Новосибирской области (код проекта 20-41-540002) и в рамках государственного задания (номер госрегистрации 121030900260-6).

© Верещагин А. С., Фомин В. М., Зиновьев В. Н., Казанин И. В., Пак А. Ю., Лебига В. А., 2021

Со временем гелий диффундирует внутрь микросфер, давление в свободном объеме реактора регистрируется датчиком. По характеру падения давления можно оценить коэффициент проницаемости стенки микросфер. Однако в ходе анализа возникает ряд трудностей, поскольку геометрические и физические параметры микросфер могут различаться.

Одним из перспективных направлений исследования является создание композитного сорбента из связующего, способного удерживать пары воды, и микросфер, поглощающих гелий [8]. Сорбент представляет собой цилиндрические гранулы достаточно большого размера по сравнению с микросферами, используемыми в промышленных реакторах. В процессе изготовления композитного сорбента стенки микросфер модифицируются, вследствие чего коэффициент проницаемости может существенно измениться.

Для описания процесса поглощения гелия разработана математическая модель поглощения гелия микросферами с учетом их дисперсионного распределения по размерам и коэффициентам проницаемости [9] и показано, что такие зависимости описываются интегральным уравнением Вольтерры второго рода.

Анализ зависимостей поглощения гелия микросферами можно проводить, используя такие параметры, как размер микросферы, толщина стенки, плотность материала стенки, размер полости и т. д., которые определяются косвенно по данным измерений и обработки фотографий, полученных с помощью электронного микроскопа [6]. Данная задача называется прямой. Обратная задача состоит в определении параметров сорбента по экспериментальным сорбционным зависимостям. Такой подход развивается в работе [10], где при описании процесса поглощения гелия дисперсными засыпками из микросфер и композитным сорбентом сорбционный объем делится на части, различающиеся скоростью сорбции.

Целью настоящей работы является исследование временных сорбционных зависимостей степени поглощения гелия микросферами или композитным сорбентом на их основе и их анализ.

1. Математическая модель сорбции гелия микросферами. Рассмотрим адсорбер — замкнутый объем, заполненный полыми микросферами или сорбентом на их основе. Предполагается, что микросферы имеют различную геометрию, а материал, из которого они изготовлены, обладает различной проницаемостью для гелия. Для того чтобы процесс сорбции и десорбции происходил в каждой точке адсорбера одинаково, необходимо, чтобы микросферы были хорошо перемешаны и равномерно распределены в пространстве.

Микросферы разделяют адсорбер на два непересекающихся объема: V_1 — свободный объем, не занятый частицами, и V_2 — объем, занятый микросферами или сорбентом на их основе. В свою очередь объем V_2 состоит из сорбционного объема (объема всех полостей микросфер) V_{21} и объема, занятого твердой оболочкой микросфер и (в случае композитного сорбента) материалом связующего.

Считается, что при подаче в адсорбер гелия с заданным давлением газ равномерно распределяется по всему свободному объему V_1 , так как характерное время поглощения гелия микросферами значительно больше времени равномерного распределения газа внутри адсорбера.

Рассматривается следующий закон поглощения гелия микросферами, основанный на модели растворения — диффузии [11]:

$$j_m = \frac{C_m S \gamma}{d} (p_1 - p_{21}). \quad (1)$$

Здесь j_m — массовый поток газа в единичную микросферу; C_m — коэффициент проницаемости материала микросферы; S — площадь поверхности микросферы; γ — отношение радиуса полости микросферы к ее радиусу; d — толщина стенки микросферы; p_1 — давление газа в свободном объеме; p_{21} — давление газа в полости микросферы.

Из формулы (1) следует, что при $p_1 > p_{21}$ происходит процесс поглощения гелия (сорбция), при $p_1 < p_{21}$ — процесс выделения гелия (десорбция). Массовый поток будет равен нулю, в случае если давления достигнут равновесного значения p_∞ . Равновесное давление определяется отношением сорбционного объема и свободного объема в адсорбере [9].

Целью эксперимента является регистрация изменения давления гелия в свободном объеме адсорбера в процессе его поглощения и выделения микросферами при стремлении к равновесной величине.

Математическая модель строится для более общего случая, когда в начальный момент времени в микросферах и свободном объеме может находиться гелий. При интерпретации экспериментальных данных полагается, что адсорбер и микросферы изначально вакуумированы, т. е. в микросферах отсутствует остаточное давление гелия. Для описания процесса сорбции гелия в такой системе все микросферы, содержащиеся в адсорбере, необходимо обозначить $(1, \dots, N)$ и ввести характерную проницаемость j -й частицы (размерность — секунда в минус первой степени), определяющую величину мгновенного массового потока гелия в микросферу, с помощью формулы

$$\beta_j = \frac{C_m^j S_j \gamma_j}{V_j d_j} R_1 T \quad (j = \overline{1, N}),$$

где C_m^j — коэффициент проницаемости материала j -й микросферы для гелия, кг/(с · м² · Па); S_j — площадь поверхности j -й микросферы, м²; d_j — толщина стенки j -й микросферы, м; γ_j — отношение радиуса полости микросферы к ее радиусу для j -й микросферы; V_j — внутренний объем j -й микросферы, м³; R_1 — газовая постоянная для гелия, Дж/(К · кг); T — температура, К.

Для микросфер, имеющих один и тот же коэффициент β , процесс поглощения происходит одинаково [9], поэтому они разбиваются на группы H_i ($i = \overline{1, n}$). Частицы k и l содержатся в одной группе только при $\beta_k = \beta_l$. Каждой группе H_i ставится в соответствие α_i — безразмерный удельный внутренний объем полостей всех микросфер, входящих в эту группу:

$$\alpha_i = V_{21}^i / V_1,$$

где V_{21}^i — суммарный внутренний объем всех полостей, входящих в группу i , м³; V_1 — свободный объем адсорбера, м³.

Математическая модель поглощения гелия группами микросфер при постоянной температуре [9] задается уравнениями

$$\frac{dM_{21}^i(t)}{dt} = K_i(p_1(t) - p_{21}^i(t)) \quad (i = \overline{1, n}); \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n M_{21}^i(t) + M_1(t) = M_0 \quad (3)$$

при начальных условиях

$$M_{21}^i|_{t=0} = M_{21,0}^i, \quad M_1|_{t=0} = M_{1,0}$$

и дополнительных соотношениях

$$p_1(t) = \frac{M_1(t)}{V_1} R_1 T, \quad p_{21}^i(t) = \frac{M_{21}^i(t)}{V_{21}^i} R_1 T \quad (i = 1, \dots, n).$$

Здесь $M_{21}^i(t)$, $M_1(t)$ — масса гелия, поглощенного i -й группой микросфер и находящегося в свободном объеме адсорбера в момент времени t ; $p_{21}^i(t)$, $p_1(t)$ — давление гелия в полости

i -й группы микросфер и в свободном объеме адсорбера в момент времени t ; $M_{21,0}^i$, $M_{1,0}$ — начальная масса гелия, поглощенного i -й группой микросфер и находящегося в свободном объеме адсорбера; M_0 — общая масса гелия в адсорбере; K_i — константа, зависящая от параметров микросфер i -й группы.

2. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающей поглощение гелия микросферами. Система уравнений (2), (3) относительно неизвестных функций $M_{21}^i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) записывается в матричном виде

$$\frac{dM(t)}{dt} = AM(t) + f, \quad M|_{t=0} = b, \quad (4)$$

где $M(t)$, f , b — вектор-столбцы размерностью n :

$$M(t) = \begin{pmatrix} M_{21}^1(t) \\ M_{21}^2(t) \\ \vdots \\ M_{21}^n(t) \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} M_0\alpha_1\beta_1 \\ M_0\alpha_2\beta_2 \\ \vdots \\ M_0\alpha_n\beta_n \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} M_{21,0}^1 \\ M_{21,0}^2 \\ \vdots \\ M_{21,0}^n \end{pmatrix},$$

A — матрица размерностью $n \times n$:

$$A = \begin{pmatrix} -(1 + \alpha_1)\beta_1 & -\alpha_1\beta_1 & \cdots & -\alpha_1\beta_1 \\ -\alpha_2\beta_2 & -(1 + \alpha_2)\beta_2 & \cdots & -\alpha_2\beta_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_n\beta_n & -\alpha_n\beta_n & \cdots & -(1 + \alpha_n)\beta_n \end{pmatrix}.$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами (4) допускает решение

$$M(t) = e^{tA} b + \int_0^t e^{(t-\tau)A} f d\tau, \quad (5)$$

где e^{tA} — матричная экспонента матрицы A [12].

В случае если матрица A имеет n различных собственных чисел, она допускает разложение

$$A = TDT^{-1}, \quad (6)$$

где T — неособая матрица размерностью $n \times n$, составленная из собственных векторов матрицы A по столбцам; D — диагональная матрица из вещественных собственных чисел λ_i ($i = \overline{1, n}$).

В данном случае матричная экспонента имеет вид [12]

$$e^{tA} = T \begin{pmatrix} e^{t\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e^{t\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e^{t\lambda_n} \end{pmatrix} T^{-1},$$

а решение (5) преобразуется следующим образом:

$$M(t) = T \begin{pmatrix} e^{t\lambda_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{t\lambda_n} \end{pmatrix} T^{-1}b + T \begin{pmatrix} -\frac{1 - e^{t\lambda_1}}{\lambda_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -\frac{1 - e^{t\lambda_n}}{\lambda_n} \end{pmatrix} T^{-1}f. \quad (7)$$

Таким образом, в случае если матрица A допускает разложения вида (6), из (7) следует, что $M(t)$ представляет собой линейную комбинацию экспонент $e^{t\lambda_i}$ ($i = \overline{1, n}$) и констант, так как T, b, f — матрицы с постоянными коэффициентами. В этом случае искомая зависимость массы гелия от времени в свободном объеме адсорбера $M_1(t)$ является также суммой гармоник $e^{t\lambda_i}$ ($i = \overline{1, n}$) и констант, так как $M_1(t)$ и $M_{21}^i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) связаны законом сохранения массы (3).

Покажем, что матрица A имеет n различных вещественных отрицательных собственных значений.

3. Анализ матрицы A на наличие собственных значений. Характеристический многочлен $\chi(\lambda)$ матрицы A имеет вид

$$\chi(\lambda) = \det(A - \lambda E) = \begin{vmatrix} -(1 + \alpha_1)\beta_1 - \lambda & \cdots & -\alpha_1\beta_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_n\beta_n & \cdots & -(1 + \alpha_n)\beta_n - \lambda \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Алгоритм вычисления определителя, стоящего в правой части соотношения (8), состоит из двух основных шагов.

1. Используя свойство неизменности определителя при выполнении операции со строками, вычитаем из строки с номером $i + 1$ строку с номером i , умноженную на $\alpha_{i+1}\beta_{i+1}/\alpha_i/\beta_i$.

2. С помощью формулы разложения по столбцу вычисляем определитель полученной после первого шага трехдиагональной матрицы.

После подстановки полученного выражения $\chi(\lambda)$ в характеристическое уравнение $\chi(\lambda) = 0$ и сокращения на множитель $(\lambda + \beta_1)(\lambda + \beta_2) \cdots (\lambda + \beta_n)$ получаем уравнение для нахождения собственных чисел

$$\frac{\alpha_1\beta_1}{\beta_1 + \lambda} + \frac{\alpha_2\beta_2}{\beta_2 + \lambda} + \dots + \frac{\alpha_n\beta_n}{\beta_n + \lambda} + 1 = 0. \quad (9)$$

Обозначим функцию, стоящую в левой части уравнения (9), через $y(\lambda)$ и опишем ее основные свойства.

1. Областью определения $X = (-\infty, +\infty) \setminus \{-\beta_1, \dots, -\beta_n\}$ является вся вещественная ось, за исключением конечного числа точек β_i ($i = \overline{1, n}$).

2. Функция $y(\lambda)$ непрерывна и убывает на области определения, так как

$$\frac{dy}{d\lambda} < 0 \quad \forall \lambda \in X.$$

3. $\lim_{\lambda \rightarrow -\infty} y(\lambda) = 1 - 0$, $\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} y(\lambda) = 1 + 0$.

4. $\lim_{\lambda \rightarrow -\beta_i - 0} y(\lambda) = -\infty$, $\lim_{\lambda \rightarrow -\beta_i + 0} y(\lambda) = +\infty$ ($i = \overline{1, n}$).

Качественно поведение зависимости $y(\lambda)$ показано на рис. 1, из которого следует, что если упорядочить все параметры β_i по убыванию, то уравнение (9) имеет n отрицательных корней λ_i , удовлетворяющих неравенству

$$\lambda_1 < -\beta_1 < \lambda_2 < -\beta_2 < \dots < \lambda_n < -\beta_n < 0.$$

Следовательно, матрица A всегда имеет n вещественных отрицательных собственных значений, и разложение (6) обоснованно.

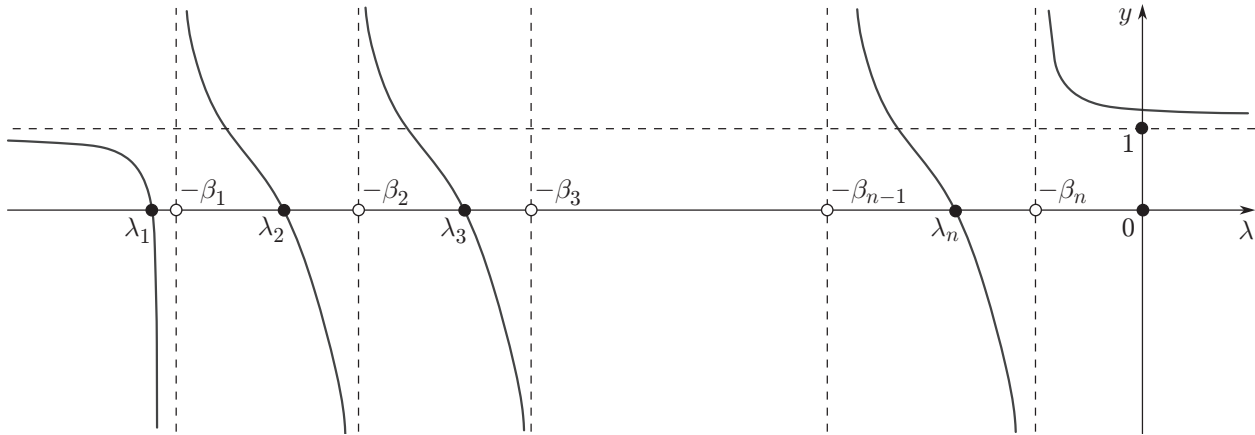


Рис. 1. Качественная зависимость $y(\lambda)$

4. Разложение зависимости массы гелия в свободном объеме от времени по гармоникам. В работе [9] показано, что между равновесным значением массы гелия, не поглощенного микросферами, $M_{1,\infty}$ и суммарной массой гелия в адсорбере M_0 существует зависимость

$$M_{1,\infty} = \frac{M_0}{1 + \alpha_0}, \tag{10}$$

где $\alpha_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i$ — суммарный удельный внутренний объем микросфер.

Таким образом, с использованием выводов, сделанных в п. 2, и формулы (10) получаем

$$M_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i e^{\lambda_i t} + \frac{M_0}{1 + \alpha_0}, \tag{11}$$

где a_i ($i = \overline{1, n}$) — амплитуда i -й гармоники; λ_i — скорость поглощения гелия i -й гармоникой, обусловленная засыпкой.

При $t = 0$ уравнение (11) принимает вид

$$\sum_{i=1}^n a_i = M_{1,0} - \frac{M_0}{1 + \alpha_0} = M_{1,0} - M_{1,\infty}. \tag{12}$$

Отсюда можно сделать вывод, что отношения $a_i / (M_{1,0} - M_{1,\infty})$ ($i = \overline{1, n}$) являются удельными сорбционными емкостями i -х гармоник.

В случае если сорбция происходит в изначально пустые микросферы ($M_{21,0}^i = 0$), начальная масса в свободном объеме адсорбера равна общей массе гелия в системе ($M_{1,0} = M_0$), и уравнение (12) преобразуется к виду

$$\sum_{i=1}^n a_i = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0} M_0.$$

5. Разложение экспериментальных зависимостей степени поглощения гелия микросферами от времени на гармоники и их анализ. Для анализа экспериментальных данных выбраны временные зависимости степени поглощения гелия микросферами различного типа и композитным сорбентом на их основе, полученные при сорбции в изначально вакуумированные частицы. Используемые временные сорбционные зависимости

Значения сорбционных параметров для микросфер МС-ВП-А9, МС-В-1Л
и композитных сорбентов на их основе

Сорбент	$T, ^\circ\text{C}$	i	Сорбционные параметры					
			$\beta, \text{ч}^{-1}$	$\lambda, \text{ч}^{-1}$	a'	α	α_0	$\varepsilon, \%$
Микросферы МС-ВП-А9 широкой фракции	110	1	1,440	-1,826	0,45	0,226	1,047	0,63
		2	0,376	-0,538	0,43	0,571		
		3	0,068	-0,076	0,12	0,249		
Микросферы МС-ВП-А9 узкой фракции (50 ÷ 63 мкм)	27	1	1,610	-0,613	0,02	0,006	0,736	0,30
		2	0,097	-0,101	0,09	0,036		
		3	0,030	-0,031	0,36	0,171		
		4	0,005	-0,007	0,53	0,523		
Микросферы МС-ВП-А9 широкой фракции	27	1	0,357	-0,363	0,02	0,015	0,882	0,59
		2	0,023	-0,026	0,27	0,121		
		3	0,003	-0,005	0,71	0,746		
Композитный сорбент на основе микросфер МС-ВП-А9 широкой фракции	27	1	6,348	-6,633	0,28	0,045	0,159	0,11
		2	1,423	-1,473	0,25	0,037		
		3	0,233	-0,238	0,13	0,021		
		4	0,014	-0,015	0,34	0,057		
Микросферы МС-В-1Л широкой фракции	—	1	0,216	-0,218	0,03	0,010	0,760	0,34
		2	0,010	-0,017	0,97	0,750		
Микросферы МС-В-1Л узкой фракции (50 ÷ 63 мкм)	20	1	0,151	-0,151	0,03	0,003	0,507	0,35
		2	0,006	-0,009	0,97	0,504		
Композитный сорбент на основе микросфер МС-В-1Л широкой фракции	—	1	5,193	-5,621	0,39	0,082	0,206	0,46
		2	0,599	-0,622	0,24	0,041		
		3	0,011	-0,012	0,37	0,083		

гелия получены с помощью метода, описанного в [6, 8]. В указанных экспериментах с использованием подхода, изложенного в [10], микросферы были разделены на n групп, для каждой из которых определялись сорбционные параметры β_i и α_i (см. таблицу). Следует отметить, что в природе не существует двух микросфер, для которых параметр β одинаков. В рассматриваемом случае каждое значение является решением обратной задачи и согласно [10] и таблице группы формируются в окрестности значений β одного порядка, однако такое поведение требует дальнейшего исследования.

С использованием полученных табличных данных и решения характеристического уравнения (9) вычислены собственные значения λ_i ($i = \overline{1, n}$). Коэффициенты a_i в (11) получены с помощью метода наименьших квадратов и экспериментальных данных. Экспериментальные данные и их аппроксимационные значения удобно представить в безразмерном виде [6]

$$M_1'(t) = \frac{M_1(t) - M_{1,\infty}}{M_0 - M_{1,\infty}}. \quad (13)$$

Представление (13) позволяет проводить оценку и сравнивать скорости установления равновесного давления для различных сорбентов. Далее вместо коэффициентов a_i представлены удельные сорбционные емкости (см. (12)):

$$a'_i = a_i / \sum_{j=1}^n a_j \quad (i = \overline{1, n}).$$

Экспериментальные данные, результаты аппроксимации и полученные гармоники приведены на рис. 2, 3 и в таблице. Помимо данных о гармониках в таблице также приведены значения удельного сорбционного объема исследуемого образца α_0 , определенного в (10), и относительные погрешности аппроксимации экспериментальных данных ε , вычисленные по формуле

$$\varepsilon = \max_{1 \leq s \leq m} \frac{|M_1(t_s) - M_{1,s}^e|}{M_{1,s}^e} \quad (14)$$

(m — число экспериментальных точек; t_s — время; $M_{1,s}^e$ — экспериментально определенное значение массы гелия в адсорбере в момент времени t_s ($s = \overline{1, m}$)).

Анализ гармоник позволяет оценить временной вклад выбранной группы микросфер, соответствующей указанной гармонике, и ее сорбционный объем. На рис. 2, 3 начальная высота соответствует вкладу гармоники в сорбционный объем исследуемого образца (в таблице ей соответствует величина a'), а величина коэффициента по модулю (в таблице λ) соответствует скорости сорбции гелия в этот объем. Пары параметров (β, α) и (λ, a'), описывающие выбранную гармонику, различаются тем, что первая характеризует группу микросфер без учета влияния других групп, а вторая — с учетом вклада других групп.

Анализируя данные, представленные в таблице и на рис. 2, 3, можно сделать следующие выводы.

Из таблицы следует, что все рассматриваемые сорбционные зависимости с большой точностью описываются предложенной моделью (относительная погрешность ε , вычисленная по формуле (14), не превышает 1 %).

Сравнение значений α_0 для микросфер МС-ВП-А9 и МС-В-1Л (см. таблицу) показало, что выделение узкой фракции из широкой уменьшает удельный сорбционный объем вследствие отделения мелких микросфер, изначально занимающих пустоты в исходной партии широкой фракции.

В случае микросфер МС-ВП-А9 широкой фракции (см. таблицу) при нагревании коэффициенты проницаемости групп микросфер β_i увеличились на один порядок, при этом произошло перераспределение удельного внутреннего объема a' . Величина проницаемости наиболее быстрой гармоники в случае микросфер МС-ВП-А9 при температуре 27 °С увеличилась с $\beta = 0,357 \text{ ч}^{-1}$ до $\beta = 1,440 \text{ ч}^{-1}$, а соответствующий ей удельный сорбционный объем a' уменьшился на 25 %.

В случае композитного сорбента на основе микросфер (см. таблицу) происходит существенное уменьшение сорбционного объема α_0 : приблизительно в 3,5–5,0 раз относительно исходных образцов обоих типов (МС-ВП-А9, МС-В-1Л широкой фракции), при этом сорбционный объем a' распределяется практически равномерно по всем гармоникам, а скорость сорбции β увеличивается на порядок. На рис. 2,з, 3,в видно, что для композитного сорбента МС-ВП-А9 быстрые (с большим по модулю значением λ) гармоники стремятся к нулю в течение 20 ч, а МС-В-1Л — в течение 10 ч с начала эксперимента, что в обоих случаях соответствует заполняемости сорбционного объема приблизительно на 67 %.

Заключение. В работе получено аналитическое решение задачи о сорбции гелия микросферами при их дисперсном распределении. Показано, что функция, описывающая массу гелия в свободном объеме адсорбера, разлагается на сумму убывающих экспонент и константы, при этом количество гармоник равно числу групп микросфер, участвующих в процессе сорбции. Показано, что результаты, полученные по представленной модели сорбции гелия микросферами, количественно и качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

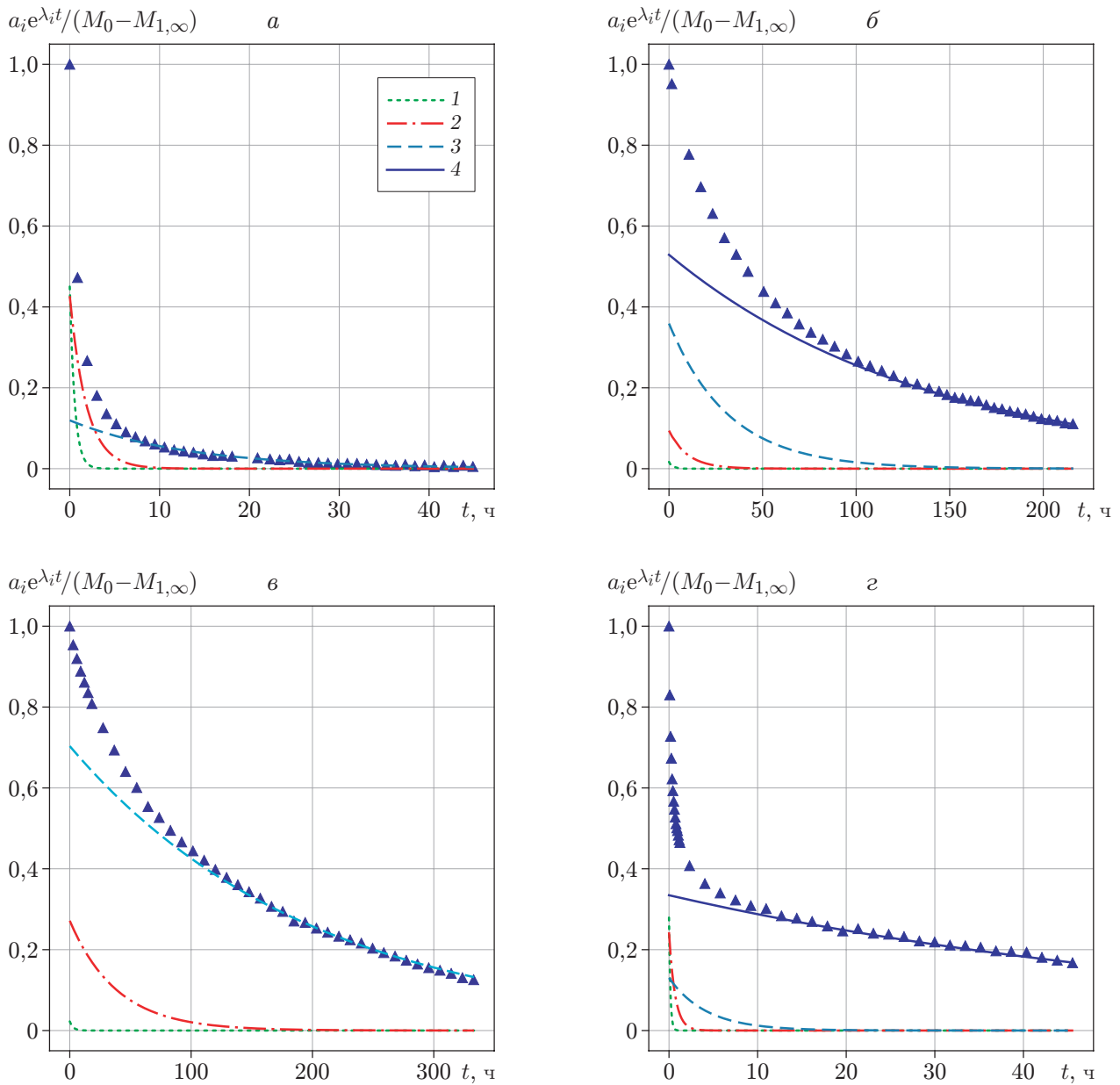


Рис. 2. Разложение временных сорбционных зависимостей на гармоники для сорбента на основе микросфер MS-VI-A9:

a — широкая фракция при температуре 110 °С, *б* — узкая фракция (50 ÷ 63 мкм), *в* — широкая фракция при температуре 27 °С, *г* — композитный сорбент на основе широкой фракции микросфер; 1–4 — номера соответствующих гармоник в разложении; точки — экспериментальные данные

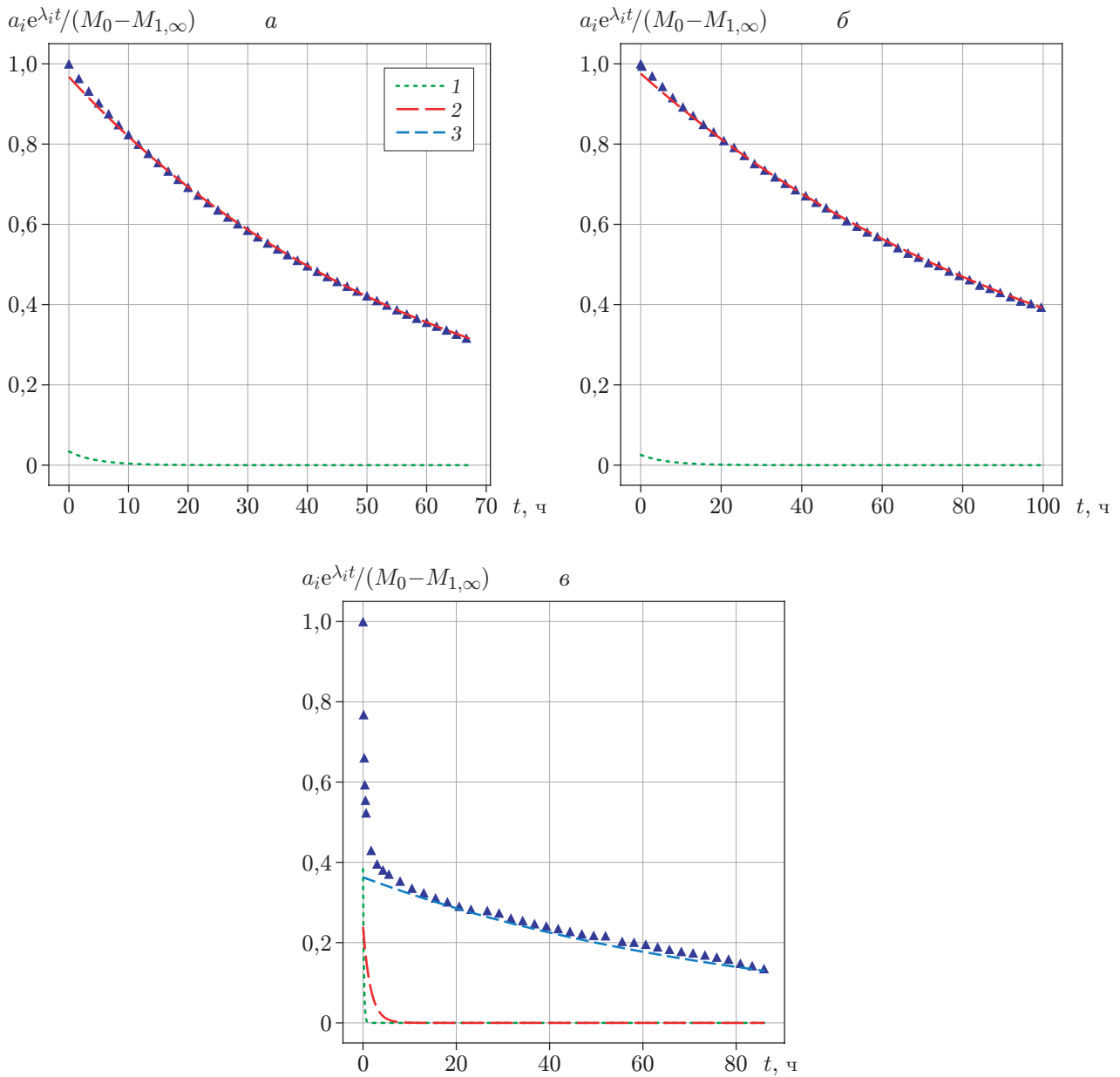


Рис. 3. Разложение временных сорбционных зависимостей на гармоники для сорбента на основе микросфер МС-В-1Л:
a — широкая фракция, *б* — узкая фракция (50 ÷ 63 мкм), *в* — композитный сорбент на основе широкой фракции микросфер; 1–3 — номера соответствующих гармоник в разложении; точки — экспериментальные данные

С использованием временных сорбционных зависимостей для микросфер МС-ВП-А9, МС-В-1Л и композитного сорбента на их основе показано, что в комплексе с результатами других работ полученное решение позволяет описать процесс поглощения гелия выбранными группами микросфер и выполнить их качественный и количественный анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2012118350 РФ, МПК В 01 D 53/02. Способ разделения многокомпонентной парогазовой смеси / В. М. Фомин, В. Н. Зиновьев, И. В. Казанин, В. А. Лебига, А. Ю. Пак, А. С. Верещагин, А. Ф. Фомина, А. Г. Аншиц, Е. А. Булчевский, А. В. Лавренов. Оpubл. 03.05.2012, Бюл. № 6.
2. Пат. 2291740 РФ, МПК В 01 D 69/12, В 01 D 61/00, В 01 D 53/22. Система и способ разделения газовой смеси / В. П. Фомичев, В. М. Фомин, Л. Н. Пузырев, С. В. Долгушев, А. С. Верещагин, А. Г. Аншиц. Оpubл. 24.02.2005.
3. Пат. 2161527 РФ, МПК⁷ В 01 D 53/22, В 01 D 61/00. Способ разделения газовой смеси / С. В. Долгушев, В. М. Фомин, В. П. Фомичев. Оpubл. 17.01.2000.
4. Верещагин А. С. Стекланные шарикИ для солнечного газа // Наука из первых рук. 2010. Т. 5. С. 32–37.
5. Верещагин А. С., Зиновьев В. Н., Фомин В. М. и др. Оценка коэффициента проницаемости стенок микросфер // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2010. Т. 5, № 2. С. 8–16.
6. Казанин И. В., Зиновьев В. Н., Пак А. Ю. и др. Проницаемость полых микросферических мембран по отношению к гелию // Инж.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 1. С. 24–36.
7. Tsugawa R. T., Moen I., Roberts P. E., et al. Permeation of helium and hydrogen from glass-microsphere laser targets // J. Appl. Phys. 1976. V. 47, N 5. P. 1987–1993.
8. Зиновьев В. Н., Казанин И. В., Лебига В. А. и др. О совместном выделении паров воды и гелия из природного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 5, № 23. С. 771–777.
9. Верещагин А. С., Казанин И. В., Зиновьев В. Н. и др. Математическая модель проницаемости микросфер с учетом их дисперсионного распределения // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 2. С. 88–96.
10. Верещагин А. С., Зиновьев В. Н., Фомин В. М. и др. Определение гелиевой проницаемости микросферических мембран по экспериментальной временной зависимости поглощения ими гелия // Инж.-физ. журн. 2019. Т. 92, № 4. С. 1059–1064.
11. Barrer R. M. Diffusion in and through solids. Cambridge: Univ. Press, 1951. (Cambridge ser. phys. chem.).
12. Годунов С. К. Обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1994.

*Поступила в редакцию 4/II 2021 г.,
после доработки — 26/II 2021 г.
Принята к публикации 1/III 2021 г.*