

DOI: 10.15593/2224-9982/2021.66.02

УДК 544.034.23

**С.В. Кулявцева, Б.В. Певченко**

АО «ФНПЦ «Алтай», Бийск, Россия

## **К ОЦЕНКЕ ПРИМЕНИМОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТАНТ СОРБЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ РДТТ**

Показано, что использование аналитических решений уравнения диффузии Фика для определения основных констант сорбции приводит к необходимости решения двуединой задачи. Это оценка области применимости аналитических решений, наиболее часто используемых при обработке результатов экспериментов, и определение репрезентативных размеров образцов в экспериментах, необходимых для построения кривых сорбции / десорбции.

Численными экспериментами установлено, что наиболее точные значения констант массопереноса определяются для малых и средних значений временного процесса абсорбции диффузанта в образец.

В связи с тем, что реальные размеры образцов отличаются от расчетных схем, используемых для аналитических решений, которые, как правило, представляются в виде полубесконечных пластин, возникает необходимость в минимизации влияния торцевых поверхностей реальных образцов на точность определения параметров массопереноса.

В процессе численно-аналитических исследований выбирали геометрию образцов из полимерных материалов с точки зрения их репрезентативности при определении коэффициентов диффузии, растворимости и набухания. Было установлено, что для получения значений констант массопереноса с точностью не выше 3 % геометрические характеристики образцов должны выбираться с относительными размерами  $L/h > 10$  ( $L$  – ширина,  $h$  – высота образца соответственно) – условия плоской всесторонней абсорбции диффузанта в пластины прямоугольной в сечении формы.

При определении коэффициентов диффузии, растворимости и набухания с точностью не выше 3 % предпочтительно использование образцов цилиндрической формы с относительными размерами  $D/h > 15$  ( $D$  – диаметр образца).

Предложен алгоритм установления констант массопереноса при совместном использовании сорбционных кривых и численного метода анализа диффузионных процессов – метода конечных элементов. При этом показаны преимущества такого подхода по сравнению с использованием аналитических методов анализа диффузионных процессов, заключающихся в снятии ограничений по размерам и форме образцов.

**Ключевые слова:** массоперенос, репрезентативность образцов-спутников, коэффициент диффузии, коэффициент растворимости, коэффициент набухания, законы Фика, молекулярная диффузия.

**S.V. Kulyavtseva, B.V. Pevchenko**

JSC “FNPC “Altay”, Biysk, Russian Federation

## **TO THE APPLICATION ASSESSMENT OF MASS TRANSFER ANALYTICAL CORRELATIONS TO DEFINE SORPTION CONSTANTS IN SPRM POLYMERIC MATERIALS**

The use of analytical solutions for Frick's diffusion equation to define the main sorption constants leading to the necessity to solve the united problem is shown. To be more exact this is the application assessment of analytical solutions for more often used experimental results and the determination of the representative sample dimensions in the experiments which are need to construct the sorption/desorption curves.

By numerical experiments it is established that the most exact values of mass transfer constants are determined for small and middle values of diffuser absorption temporary process with the help of analytical solutions.

Because of the difference in real sample dimensions and structural models used for analytical solutions which as a rule are presented in the form of semi-infinite plates it is necessary to minimize the influence of side surfaces in real samples on the accuracy of mass transfer parameters determination.

The numerical-analytic study according to the geometry of polymeric samples from the point of view their representation to define diffusion, solubility and swelling coefficients is conducted. Herewith it is brought out that to obtain the values of mass transfer constants to an accuracy of not more 3 %, the sample geometric features must be chosen with relative dimensions  $L/h > 10$  ( $L$  – width,  $h$  – height of sample, accordingly) – the conditions of plane omnidirectional absorption of the diffuser into the right-angle-formed plates.

To obtain the diffusion, solubility and swelling coefficients to an accuracy of not more 3 % the cylinder samples with relative dimensions  $D/h > 15$  ( $D$  – diameter,  $h$  – height, accordingly) should be preferably used.

The algorithm of mass transfer constants determination when jointly use the sorption curves and the numerical method of diffusion analysis – finite element method is proposed. Herewith the advantages of such approach removing the sample size and shape limits are shown in comparison with the analytical methods of diffusion analysis.

**Keywords:** mass transfer, samples representation, diffusion coefficient, solubility coefficient, swelling coefficient, Fick's laws, molecular diffusion.

Конструкционные особенности крупногабаритных ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) заключаются в наличии зоны скрепления заряда с корпусом через промежуточные слои, основу которых составляют: теплозащитное покрытие (ТЗП), защитно-крепящий слой (ЗКС), клеевой состав (КС) [1, 2].

Широко известно, что существующая технология изготовления прочноскрепленных зарядов РДТТ не освобождает пристеночные слои заряда от существенного недостатка – ужесточения материала заряда вследствие различия сил межмолекулярных взаимодействий в материалах смесового ракетного твердого топлива (СРТТ) и ТЗП. В преобладающем числе случаев явление охрупчивания (ужесточения) пристеночных слоев в СРТТ приводит в той или иной степени к снижению механической работоспособности РДТТ в целом [3, 4].

Причины ужесточения материала заряда объясняются тем, что пластифицирующие добавки мигрируют из СРТТ в ТЗП, обедняя тем самым слои заряда, прилегающие к корпусу. Устранение или уменьшение охрупчивания зарядов на границах раздела связывается с необходимостью исследований процессов массопереноса в полимерных материалах, при этом достоверность характерных особенностей изменения концентрации пластификатора зависит от корректного моделирования диффузионных процессов в пристеночных слоях и в немалой степени – от точности установления констант массопереноса.

Различные технологические стадии изготовления заряда накладывают свой отпечаток на изменение физико-механических свойств изделий в пристеночных слоях вследствие таких проявлений массопереноса, как молекулярная диффузия, термодиффузия, бародиффузия, их одновременная или раздельная комбинация, а также массоперенос при фазовых превращениях при отверждении СРТТ.

Приведенный перечень особенностей миграционных процессов при изготовлении РДТТ свидетельствует об изменении диффузионных констант для каждого из рассматриваемых случаев массопереноса. Очевидно, что для получения объективной картины физико-

механического состояния заряда на границе скрепления с корпусом на базе соответствующих математических моделей и/или экспериментов константы массопереноса необходимо устанавливать, изучать и учитывать.

Структурная сложность гетерогенных систем вызывает необходимость рассмотрения диффузионных моделей с точки зрения феноменологической теории массопереноса, предложенной Максвеллом [5] и впоследствии развитой, в том числе применительно к задачам диффузии [6, 7].

Теоретические методы анализа, аналитические или численные, используемые для моделирования процессов диффузии, позволяют в сопоставлении с данными эксперимента на образцах установить параметры массопереноса, такие как коэффициенты растворимости, набухания и диффузии.

В настоящей работе, оставляя на позиции феноменологической теории массопереноса, не рассматриваем отдельно влияние инородных включений в материале образца на параметры массопереноса. Тем не менее остается возможность давать оценки изменению параметров диффузионных процессов в полимерах в зависимости от концентрации включений и их вида.

Рассмотрим гравиметрический метод [8] определения параметров массопереноса на примере абсорбции диффузанта в полимерный образец при его полном погружении в растворимое вещество. В экспериментах, как правило, используются образцы, имеющие простейшие геометрические формы – пластины в виде параллелепипеда или цилиндра.

Использование гравиметрического метода основано на измерении массы диффузанта  $m_t$  в насыщаемом объеме образца через некоторый наперед заданный временной интервал  $\Delta t$  при постоянном давлении и температуре.

Измерения изменений массы образца заканчиваются при полном насыщении образца диффузантом. При этом полагается, что по прошествии некоторого времени  $t_n$  выполняется условие

$$m_n(t_n) = \text{const}, \quad (1)$$

где  $t_n$  – минимальное значение времени, при котором масса диффузанта в образце  $m_i(t \rightarrow t_n) = m_n$  не изменяется в течение двух последующих временных интервалов  $2\Delta t$ . Интервал времени измерений может задаваться в секундах, часах или сутках.

Методика оценки величины коэффициента диффузии заключается в сопоставлении экспериментальных измерений массы диффузанта в образце с соответствующими численными или аналитическими решениями.

Из-за сложности аналитических решений поставленной задачи расчетная схема образца упрощается до полубесконечной пластины конечной толщины  $h$  (рис. 1, а), при этом диффундирующее вещество поступает в тело через обе границы пластины ( $y = 0, y = h$ ), на которых поддерживается некоторая постоянная, не зависящая от времени концентрации диффундирующего вещества  $K_p$  (здесь  $K_p$  – коэффициент растворимости – максимальное значение концентрации диффузанта в насыщенном теле, кг/м<sup>3</sup>).

Как известно, решения задач абсорбции представляют собой результаты интегрирования второго закона Фика [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D \operatorname{divgrad} C, \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты, м;  $t$  – время;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/сут;  $C(t)$  – концентрация диффузанта в единице объема растворителя, кг/м<sup>3</sup>.

Заметим, что, несмотря на упрощение расчетной схемы, аналитические решения уравнения (2) широко используются для инженерных экспресс-оценок параметров диффузии из-за простоты и прозрачности анализа.

Решение уравнения (2) для случая одномерной диффузии (миграции диффузанта через верхнюю и нижнюю грани пластины (см. рис. 1, а)) при малых и средних значениях времени массопереноса получено в виде [9]

$$\frac{m_t}{m_n} = \frac{4}{\pi^{1/2}} \sqrt{\frac{Dt}{h^2}}. \quad (3)$$

Если ввести замену переменных, т.е.  $y = \frac{m_t}{m_n}$  и  $x = \sqrt{t_p}$  ( $0 < t_p \leq t_n$  – некоторое наперед заданное расчетное время), выражение (3) переписывается в виде

$$y = Gx,$$

где  $G = \frac{4\sqrt{D}}{\pi^{1/2}h}. \quad (4)$

С другой стороны, по определению,

$$G = \frac{\partial(y)}{\partial(x)} = \frac{\partial\left(\frac{m_t}{m_n}\right)}{\partial\left(\sqrt{t_p}\right)},$$

где  $G$  – градиент, определяемый по среднему участку линейной сорбции:

$$G = \operatorname{tg}\alpha,$$

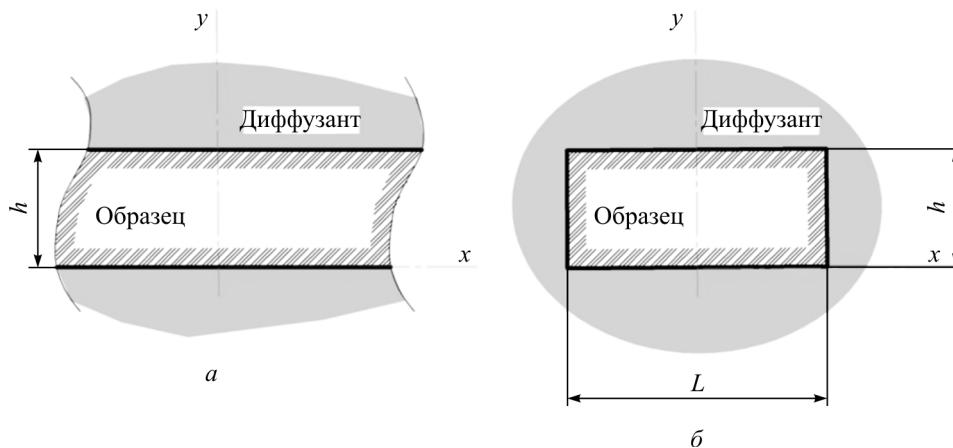


Рис. 1. Расчетные схемы для аналитических (а) и численных (б) представлений сорбции диффузанта пластиной

при этом коэффициент диффузии может быть вычислен из уравнения (4):

$$D = \frac{\pi h^2}{16} G^2, \quad (5)$$

Коэффициент растворимости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) определяют взвешиванием массы образца в его насыщенном состоянии  $m_{pd}(t \rightarrow t_n)$ , кг:

$$K_p = \frac{m_n}{V_p}, \quad (6)$$

где  $V_p$  – объем образца без диффузанта,  $\text{м}^3$ .

Очевидно, для достоверной оценки констант сорбции оказывается необходимым рассмотрение и решение двуединой задачи. Первая из них восходит к необходимости установления рациональных размеров образцов, которые должны быть выбраны для эксперимента, поскольку полубесконечная расчетная схема, принятая для аналитического решения (см. рис. 1, а), отличается от конечных размеров реальных образцов. При этом решение задачи сводится к нахождению условий, при которых влияние диффузии со стороны боковых граней минимально, с тем, чтобы иметь возможность использовать аналитические решения с известной погрешностью при обработке результатов экспериментов.

И вторая задача связывается с необходимостью установления области применимости уравнения (3).

Для решения двуединой задачи воспользуемся альтернативным методом – методом конечных элементов (МКЭ), позволяющим рассматривать соответствующие задачи диффузии последовательно в одномерной (см. рис. 1, а), двумерной (рис. 1, б) и трехмерной постановках задач абсорбции диффузанта в пластину (образец). Для трехмерного случая решение задачи получим, используя расчетную схему в виде цилиндрического образца высотой  $h$  и диаметром  $D_{\text{ц}} = L$  (см. рис. 1, б).

Решение задач диффузии МКЭ основывается на возможности обобщения уравнений теплопроводности и диффузии, поскольку во многих задачах взаимосвязанного тепло- и массопереноса время протекания тепловых и диффузионных процессов соизмеримо [9]. В связи с тем, что уравнение Фурье для тепло-

проводности аналогично уравнению диффузии Фика, при решении задач массопереноса используется алгоритм нестационарной теплопроводности с привлечением пакета программ ANSYS Mechanical Students 2020 [10].

Исходные данные для расчетов приняты следующими.

Полагая, что материал образца гетерогенный и однородный, связь между дисциплинами для нестационарных задач устанавливаем заданием коэффициента диффузии в коэффициенте теплопроводности. Теплоемкость и плотность задаем равными единице (в уравнении диффузии нет соответствующих аналогов).

В случае численных решений сорбции диффузанта пластиной конечных размеров диффундирующее вещество поступает в тело как через обе границы ( $y = 0, y = h$ ) образца, так и через его боковые грани (см. рис. 1, б), чем достигается более реалистичная картина массопереноса.

На границах расчетных схем при решении аналогичной «температурной» задачи в качестве граничных условий, не изменяющихся во времени, задается величина коэффициента растворимости. Начальные условия при  $t_p = 0$  ( $0 \leq t_p \leq t_n$ ): концентрация диффузанта в пластине задается нулевой в связи с отсутствием диффузанта в объеме образца до начала эксперимента.

При решении двуединой задачи расчетная схема для численного анализа представляет собой в сечении прямоугольник (см. рис. 1, б) размером  $L \times h$  (м).

Для определенности анализа исходные расчетные данные приняты следующими.

Высота образца  $h = 0,002$  м. Длина образца варьируется начиная от  $L = 0,002$  м и выше. Плотность образца  $P_p = 1540$   $\text{кг}/\text{м}^3$ , плотность диффузанта  $P_d = 1890$   $\text{кг}/\text{м}^3$ . Коэффициент диффузии  $D = 1,2 \cdot 10^{-8}$   $\text{м}^2/\text{сут}$ . Коэффициент растворимости  $K_p = 1512$   $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Решение одномерной задачи с использованием МКЭ получим, задавая на боковых гранях расчетной схемы (см. рис. 1, б) условия диффузионной изоляции, т.е. поток диффузанта через боковые грани равен нулю. В этом случае размер  $L$  может быть произвольным.

Сопоставление аналитических и численных решений по количеству массы (доли сорбции) диффузанта, проникающего в сорбент

Параметр	Аналитика	МКЭ	Аналитика	МКЭ	Аналитика	МКЭ	Аналитика	МКЭ
$m_t/m_n$	0,25	0,2495	0,5	0,4982	0,75	0,7259	1,0	0,8820
$t_p$ , сут	4		16		36		64	
$\delta$ , %	0,2		0,36		3,38		13,7	

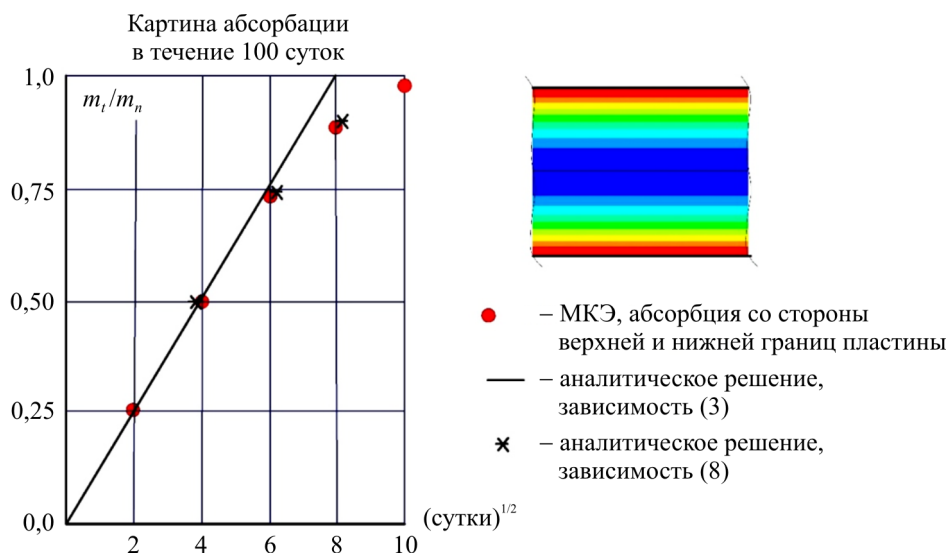


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетов доли сорбции, полученных численным и аналитическим методами

В таблице представлено сопоставление аналитических (3) и численных решений (МКЭ) по количеству массы диффузанта, проникающего в сорбент, для различных значений времени массопереноса, при толщине пластины  $h = 0,002$  м.

На рис. 2 представлено сопоставление результатов расчетов доли сорбции в полубесконечную пластину, полученных численным и аналитическим методами. Из анализа данных таблицы и рис. 2 видно, что при приближении к насыщенному состоянию образца

$\lim_{t \rightarrow t_n} \frac{m_t}{m_n} = 1$  формула (3) дает завышенные бо-

лее чем на 13 % по сравнению с численным решением результаты. Погрешность в оценке времени полного насыщения много выше.

Заметим, что принятый в технике уровень допустимых расчетных погрешностей не должен превышать 5 % – барьер от ожидаемых точных решений.

В этой связи из анализа таблицы устанавливаем, что для определения параметров массопереноса зависимость (3) может быть

использована с точностью до 5 % для малых и средних значений времени диффузионного процесса, когда соотношение  $m_t/m_n$  находится в диапазоне (см. рис. 2)

$$0 < m_t/m_n \leq 0,75. \quad (7)$$

Таким образом, при определении коэффициентов диффузии наиболее приемлемым является вариант, при котором соотношение (3) совместно с графиком зависимости доли сорбции / десорбции используется для случая

$$m_t/m_n \approx 0,5.$$

Более точное аналитическое решение уравнения диффузии (2) для случая сорбции  $m_t/m_n \geq 0,5$  (расчетная схема, см. рис. 1, а) получено в виде [9]

$$\text{Ln} \left( 1 - \frac{m_t}{m_n} \right) = \text{Ln} \frac{8}{\pi^2} - \frac{D\pi^2 t}{h^2}. \quad (8)$$

Результаты расчетов по уравнению (8) на рис. 2 показывают отклонение от числен-

ных вычислений с точностью менее 0,3 % до значений времени сорбции  $\frac{m_t}{m_n} \leq 0,85$ .

Таким образом, используя соотношение (8), коэффициент диффузии  $D$  можно определить при больших значениях времени  $t$ .

Однако при приближении к насыщению материала образца диффузантом соотношение (8) становится непригодным, поскольку

$$\lim_{t \rightarrow t_n} \ln \left( 1 - \frac{m_t}{m_n} \right) \rightarrow \infty, \text{ что противоречит логике}$$

массопереноса.

На рис. 3 представлено отклонение результатов расчетов, выполненных по двумерной расчетной схеме МКЭ (см. рис. 1, б), от соответствующих аналитических решений (соотношение (3)) в зависимости от размеров образцов  $L/h$ .

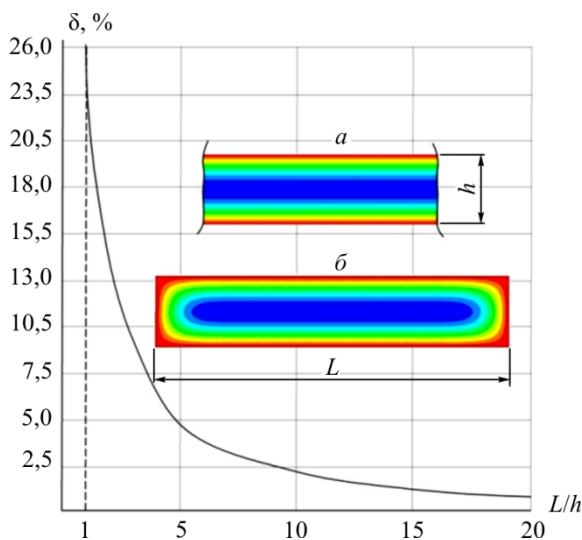


Рис. 3. Относительная погрешность отклонений расчетных значений массы диффузанта  $m_p$  в плоском образце МКЭ от соответствующих теоретических значений массы  $m_t$  на момент времени абсорбции  $t_p = 16$  сут:  $a$  – полубесконечная пластина;  $b$  – пластина конечных размеров

Относительная погрешность между рассчитанным по МКЭ значением массы диффузанта  $m_p$  и соответствующим значением массы  $m_t$ , рассчитанным по зависимости (3) на момент времени  $t_p = 16$  сут, образующейся вследствие замены полубесконечной пластины на

пластину конечных размеров (см. рис. 3), получена по зависимости  $\delta = (m_p - m_t)100/m_t$ .

Таким образом, сравнительный анализ расчетных значений массы диффузанта в образце (см. рис. 3) показывает, что зависимость (3) может быть использована для оценки констант массопереноса с относительной погрешностью, не превышающей  $\delta = 2,5$  % для пластин с отношением размеров  $L/h = 10$  и средних значений времени абсорбции, т.е. при  $m_t/m_n = 0,5$ .

Аналогичные расчеты для значений параметров  $m_t/m_n \leq 0,5$  показывают относительную погрешность  $\delta \leq 2,5$  % для средних и малых значений времени абсорбции.

Сопоставление решений по зависимости (3) и по МКЭ в осесимметричной постановке задачи сорбции для случая полубесконечной пластины показывает относительную погрешность расчетных значений массы диффузанта в образце на момент времени  $t_p = 16$  сут на уровне, не превышающем  $\delta = 0,18$  % (расчетная схема, см. рис. 1, а).

На рис. 4 представлено отклонение результатов расчетов, выполненных для цилиндрического образца МКЭ (см. рис. 1, б), от результатов расчетов абсорбции диффузанта в полубесконечную пластину (см. рис. 1, а) в зависимости от соотношения размеров образцов  $D_{ц}/h$ .

Таким образом, определение параметров массопереноса возможно на образцах цилиндрической формы с относительными размерами  $D_{ц}/h > 15$  при использовании соотношения (3) с точностью не выше 3 % относительной погрешности при малых значениях времени абсорбции для случая  $m_t/m_n < 0,5$ .

Рассмотренные выше экспериментально-аналитические подходы к определению констант массопереноса оказываются справедливыми при различного рода допущениях, снимающих их ограниченное применение. В данном случае это касается установления репрезентативных размеров образцов и области применимости решений изменения концентрации диффузанта во времени как результата интегрирования второго закона Фика.

При решении рассмотренных выше и других аналогичных задач проницаемости гетерогенных сред, в том числе при сложном характере распределения полей концентраций, например в составных полимерных материалах, оценка параметров массопереноса возможна лишь при использовании численных методов математического моделирования. Некоторые из таких подходов рассмотрены в работе ANSYS Mechanical Students 2020.

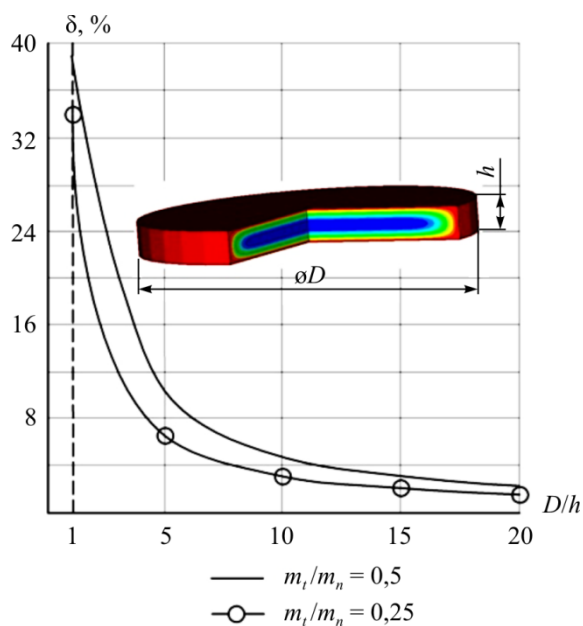


Рис. 4. Относительная погрешность между значениями массы диффузанта  $m_p$  в цилиндрическом образце, рассчитанной по МКЭ, и массы диффузанта  $m_i$ , рассчитанной по зависимости (3) на момент времени абсорбции  $t_p = 4$  сут (○) и  $t_p = 16$  сут соответственно

В наших работах при использовании МКЭ для оценок диффузионных характеристик решается обратная задача диффузии для малых значений времени сорбции.

Алгоритм решения задачи заключается в следующем.

В качестве реперной точки для анализа принимается масса диффузанта  $m_i$  в образце, полученная экспериментально для некоторого определенного исследователем времени  $t_p$  эксперимента.

Далее задается пробное значение коэффициента диффузии и решается МКЭ нестационарная задача по определению расчетного

значения массы диффузанта  $m_p$  в образце на момент времени  $t_p$ . В том случае если значение  $m_p > m_i$ , коэффициент диффузии уменьшается на порядок, и, наоборот, если значение  $m_p < m_i$ , коэффициент диффузии увеличивается на порядок. Решение задачи продолжается до тех пор, пока не определятся два значения коэффициента диффузии, для одного из них  $m_p > m_i$ , для другого  $m_p < m_i$ . Затем уточняется коэффициент диффузии в итерационном процессе с использованием метода половинного деления (метод дихотомии) [11]. Метод половинного деления позволяет рассчитать коэффициент диффузии с любой заданной наперед точностью отклонения массы диффузанта  $m_p$  от  $m_i$  на момент времени  $t_p$ .

Практика расчетов показывает, что пяти-шести приближений оказывается достаточно для определения коэффициента диффузии с точностью до 1 %.

Таким образом, использование численных методов анализа позволяет не заботиться об установлении репрезентативных размеров образцов, поскольку имеется возможность моделирования процессов диффузии для расчетных схем, совпадающих с физической геометрией образцов.

### Заключение

Среди рассмотренных аналитических методов анализа диффузионных процессов, используемых для получения констант массопереноса, наиболее предпочтителен вариант использования соотношения (3) совместно с кривой сорбции при малых и средних значениях времени эксперимента. При этом в экспериментах для получения значений констант массопереноса с точностью не выше 3 % геометрические характеристики образцов должны выбираться с относительными размерами  $L/h > 10$  ( $L$  – ширина,  $h$  – высота образца соответственно) – условия плоской всесторонней абсорбции диффузанта в пластине прямоугольной в сечении формы.

При определении параметров массопереноса с точностью не выше 3 % относительной погрешности предпочтительно использо-

вание образцов цилиндрической формы с относительными размерами  $D/h > 15$  ( $D$  – диаметр,  $h$  – высота образца), при безусловном выполнении условия (7).

Предложен алгоритм установления констант массопереноса при совместном использовании сорбционных кривых и численного

метода – метода конечных элементов. При этом показаны преимущества такого подхода по сравнению с использованием аналитических методов анализа диффузионных процессов, заключающихся в снятии ограничений по размерам, форме образцов и времени эксперимента.

### Библиографический список

1. Рогов Н.Г., Ищенко М.А. Смесевые ракетные твердые топлива: Компоненты. Требования. Свойства. – СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2005. – 127 с.
2. Alain Davenas A. Solid rocket propulsion technology. – Pergamon Press, 1992. – 620 p.
3. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива: учеб. для машиностроит. вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. Agrawal J.P., Agrawane N.T., Diwakar R.P. Nitroglycerine (NG) migration to various unsaturated polyesters and chloropolyesters used for inhibition of rocket propellants // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1999. – No. 24. – P. 371–378.
5. Byrd J.D., Gui C.A. Destructive effects of diffusing species in propellant bond systems. – 1985. – AIAA Paper 85. – P. 1493.
6. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism. – Oxford: University Press, 1904. – Vol. 1. – P. 44.
7. Michaels A.S., Bixler H.J., Fein H.L. Gas transport in thermally conditioned linear polyethylene // J. Appl. Phys. – 1964. – Vol. 35. – P. 3165.
8. Райченко А. Математическая теория диффузии в приложениях. – Киев: Наукова думка, 1981. – 355 с.
9. Аналитическая химия. Химические методы анализа / под. ред. О.М. Петрухина. – М.: Химия, 1992. – 400 с.
10. Бекман И.Н. Математика диффузии: учеб. пособие. – М.: ОнтоПринт, 2016. – 400 с.
11. Романовский И.П., Бекман И.Н. Феноменологическая теория диффузии в гетерогенных средах и ее применение для описания процессов мембранного разделения // Вестник МГУ. Сер. Химия. – 1981. – Т. 22. – С. 517.

### References

1. Rogov N.G., Ishchenko M.A. Smesevye raketnye tvyordye topliva: Komponenty. Trebovaniya. Svoystva. [Mixed Rocket Solid Propellants: Components. Requirements. Properties.]. St.Peterburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology, – 2005, 127 p.
2. Alian Davenas. A. Solid Rocket Propulsion Technology // Pergamon Press, 1992, p.620.
3. Fakhrutdinov I.Kh., Kotelnikov A.V. Konstruktivnyy i projektivnyy dizayn raketnykh dvigateley tvyordogo topliva: Uchebnik dlya mashinostroyitelnykh vuzov [Design and Design of Solid Fuel Rocket Engines: A Textbook for Engineering Universities]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987, 328 p.
4. Agrawal J.P. Nitroglycerine (NG) Migration to Various Unsaturated Polyesters and Chloropolyesters Used for Inhibition of Rocket Propellants / J.P. Agrawal, N.T. Agrawane, R.P. Diwakar // Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999, No. 24, pp. 371-378.
5. Byrd J.D. Destructive Effects of Diffusing Species in Propellant Bond Systems / J.D. Byrd, C.A. Gui // AIAA, 1985, pp. 1493.
6. Maxwell J.C. Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: University Press, 1904, Vol. 1, P. 44.
7. Michaels A.S., Bixler H.J., Fein H.L. Gas Transport in Thermally Conditioned Linear Polyethylene // Appl. Phys, 1964, Vol. 35, P. 3165.
8. Raychenko A. Matematicheskaya teoriya diffusii v prilozheniyakh [Mathematical theory of diffusion in applications]. Kiev: Naukova Dumka, 1981, P. 355.
9. Petrukhin O.M. Analiticheskaya khimiya. Khimicheskie metody analiza [Analytical chemistry. Chemical methods of analysis]. Moscow: Khimiya, 1992, 400 p.
10. Bekman I.N. Matematika diffusii: uchebnoe posobie [Mathematics of Diffusion: A textbook]. Moscow: OntoPrint, 2016, 400p.



11. Romanovskiy I.P., Bekman I.N. Fenomenologicheskaya teoriya diffuzii v geterogennykh sredakh i yeye primeneniye dlya opisaniya protsessov membrannogo razdeleniya [Phenomenological theory of diffusion in heterogeneous media and its application for description. membrane separation processes]. MOSCOW UNIVERSITY CHEMISTRY BULLETIN, 1981, Vol. 22, P. 517.

#### **Об авторах**

**Кулявцева Светлана Владимировна** (Бийск, Россия) – ведущий инженер-руководитель группы АО «ФНПЦ “Алтай”» (659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1; e-mail: ud@frpc.secna.ru).

**Певченко Борис Васильевич** (Бийск, Россия) – кандидат технических наук, генеральный директор АО «ФНПЦ “Алтай”» (659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1; e-mail: ud@frpc.secna.ru).

#### **About the authors**

**Svetlana V. Kulyavtseva** (Biysk, Russian Federation) – Lead Engineer-head of group, JSC "FNPC "Altay" (1, Sotsialisticheskaya st., Biysk, 659322, Russian Federation; e-mail: ud@frpc.secna.ru).

**Boris V. Pevchenko** (Biysk, Russian Federation) – General Director JSC "FNPC "Altay" (1, Sotsialisticheskaya st., Biysk, 659322, Russian Federation; e-mail: ud@frpc.secna.ru).

Получено 07.06.2021