

УДК 536.248.2

**ДИНАМИКА ХЕМОСОРБЦИИ РЕГЕНЕРАТИВНЫМИ  
ВЕЩЕСТВАМИ НА ОСНОВЕ СУПЕРОКСИДОВ  
ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ**

**С.В. Мищенко<sup>1</sup>, П.В. Балабанов<sup>1</sup>, А.А. Кримштейн<sup>2</sup>,  
С.В. Пономарев<sup>1</sup>**

*Кафедра «Управление качеством и сертификация»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ» (1); pav-balabanov@yandex.ru;  
кафедра «Транспортные установки», ГОУ ВПО «МАДИ» (2)*

**Ключевые слова и фразы:** динамика; емкость; коэффициент массообмена; массообмен; супероксид; хемосорбция.

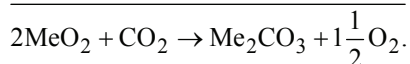
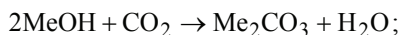
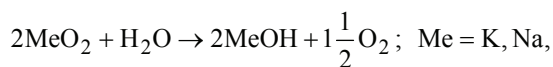
**Аннотация:** Приведены аналитические решения уравнений динамики хемосорбции, определены параметры уравнений для регенеративных веществ на основе супероксидов и поглотителей на основе гидрооксидов щелочных металлов.

**Обозначения**

$C, C_0$ – текущая и начальная концентрации реагента соответственно, $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;	$x$ – продольная координата;
$D$ – коэффициент продольного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$ ;	$\beta$ – коэффициент массообмена, $\text{с}^{-1}$ ;
$w$ – средняя по сечению скорость, $\text{м}/\text{с}$ ;	$\varphi, \varphi_0$ – текущее и предельное значения поглощения реагента соответственно, $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;
	$\tau$ – время, $\text{с}$ .

**Введение**

Хемосорбционные процессы, связанные с поглощением слоем химического поглотителя (ХП) или регенеративного продукта (РП) примесей из газовой среды, широко используются в процессах восстановления атмосферы. В случае регенерации атмосферы веществами на основе супероксидов щелочных металлов (калия или натрия) протекают процессы поглощения диоксида углерода и паров воды с одновременным выделением кислорода. Химическая реакция такого процесса описывается следующим образом:



Указанные хемосорбционные процессы протекают при регенерации атмосферы в подводных и космических объектах, в индивидуальных и коллективных изолирующих средствах защиты различного назначения.

Динамика процессов хемосорбции, как части сорбционных процессов, может быть описана на основании известных уравнений динамики сорбции с соответствующей заменой уравнения кинетики (массообмена) на уравнения, характерные для процессов хемосорбции. Однако в условиях динамики при поглощении примеси в слое сорбента (хемосорбента) концентрации реагентов по длине работающего слоя меняются от максимальных значений до нуля, поэтому одной из наиболее сложных задач является определение вида уравнений кинетики процесса и массообменных характеристик (коэффициентов массообмена и емкостных характеристик).

Динамике сорбционных процессов посвящено достаточно много литературы. Например, общеизвестно уравнение Шилова [1], определяющее зависимость времени защитного действия слоя определенной длины от концентрации на входе, емкости сорбента и скорости потока с учетом факторов размытия фронта концентрации. Исследования, проведенные в 1950–1980 гг., позволили сформировать сегодняшнее представление о динамике сорбционных процессов.

Для объема  $V$  шихты, достаточно малого по сравнению с объемом всего слоя, уравнение материального баланса имеет вид [2]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V (C + \varphi) dV = - \int_V \nabla(wC) dV + D \int_V \nabla^2 C dV. \quad (1)$$

Разбивая объем  $V$  шихты на две части: объем  $V_1$  пустот в шихте и объем  $V_2$  частиц шихты, и учитывая, что поглощение за счет химической реакции есть величина сорбции (хемосорбции), получим

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} C dV + \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \varphi dV = - \int_{V_1} \nabla(wC) dV + D \int_{V_1} \nabla^2 C dV. \quad (2)$$

Уравнение (2) после ввода обозначений

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V}; \quad 1 - \varepsilon = \frac{V_2}{V}; \quad \bar{C} = \frac{1}{V_1} \int_{V_1} C dV; \quad \bar{\varphi} = \frac{1}{V_2} \int_{V_2} \varphi dV$$

примет вид

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \tau} = -\varepsilon \nabla(w\bar{C}) + \varepsilon D \nabla^2 \bar{C}. \quad (3)$$

В уравнение (3) входят две неизвестных величины  $\bar{\varphi}$  и  $\bar{C}$ . Вид функциональной связи между ними определяется в зависимости от области протекания процесса динамики сорбции. Если скорость массообмена велика, то говорят о равновесной динамике сорбции [1]. В этом случае зависимость между величинами  $\varphi$  и  $C$  определяется изотермой сорбции  $\varphi = f(C)$  [3], которая может иметь весьма разнообразный вид. Если связь между  $\varphi$  и  $C$  задается уравнением вида

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \beta [C - f(C)], \quad (4)$$

то динамика сорбции называется неравновесной.

Аналитические решения уравнений (3) – (4) с соответствующими начальными и граничными условиями получены только для одномерного случая линейной изотермы и на асимптотической стадии параллельного переноса фронта [4 – 6].

Классическое решение приведено в работе [4] для уравнения (3) и линейной изотермы сорбции  $\varphi = \text{const}C$  при отсутствии продольного переноса, то есть члена  $D\nabla^2 C$  в уравнении (3).

Система уравнений (3) – (4) может быть решена, например, методом Римана [7] или с применением операционного исчисления, что было сделано Фернесом еще в 1928 г. [8].

Существуют решения, полученные Л.В. Радушкевичем [2, 9] для равновесной динамики и с учетом продольного переноса.

В работе [10] получены точные решения для систем неравновесной динамики сорбции с учетом внутридиффузионной кинетики гранулами шарообразной формы. Следует отметить, что решения получены, в основном, методом операционного исчисления и имеют приемлемый вид в виде интеграла «ошибок» только на асимптотической стадии процесса.

При нелинейной изотерме, приводящей к нелинейному виду систему уравнений динамики сорбции, аналитические решения не найдены. Для решения уравнений с нелинейной изотермой П.П. Золотарёв предложил аппроксимировать изотерму кусочно-линейными функциями [11]. Более часто используют метод параллельного переноса, то есть решение на асимптотической стадии процесса [12], используя стабилизирующее действие выпуклой изотермы (закон Викке).

Решение системы уравнений динамики хемосорбции осуществляется введением переменной  $z = x - vt$ , где  $v$  в данном случае скорость переноса фронта, приводящей к известному соотношению Зельдовича [4, 12] при отсутствии продольных эффектов

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \quad (5)$$

При выпуклой изотерме согласно [6] соотношение Зельдовича можно записать и для случая уравнений с продольным переносом, если  $\frac{1}{\beta\varepsilon} = \frac{1}{\beta} + \frac{D}{w^2}$ .

Существует мало работ, посвященных исследованиям вопроса собственно динамики хемосорбции. Классическими можно считать две работы Г.М. Панченкова [13], Ю.А. Бермана и Р.Ф. Нагаева [14]. В этих работах показаны методы решения систем уравнений сорбции при существенно нелинейном виде уравнения массообмена. В [15] приведено решение той же задачи для произвольных начальных и граничных условий для уравнений массообмена бимолекулярной реакции.

Однако приведенными в литературе данными не исчерпываются виды уравнений массообмена. Более того, отсутствуют решения для выделения вещества, в нашем случае кислорода. В работе [16] показано, что сложная внутридиффузионная кинетика химических процессов при определенных условиях может быть формализована уравнением вида

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} = \beta C \left( 1 - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right).$$

Подобного типа уравнения приводят к нелинейным системам в частных производных, но при отсутствии параллельного переноса в ряде случаев уравнения динамики хемосорбции могут быть решены аналитически.

С учетом сказанного, в настоящей работе приводятся решения гиперболических нелинейных систем уравнений динамики хемосорбции в отсутствие продольного переноса для уравнений кинетики следующего вида:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \beta C \left( \frac{1}{\frac{\varphi}{\varphi_0} + \alpha} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \beta C \left( 1 - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\beta C e^{-\gamma \frac{\varphi}{\varphi_0}}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\beta C \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^n, \quad n = 1, 2, \quad (9)$$

где  $\alpha, \gamma$  – постоянные величины.

### Аналитические решения систем уравнений динамики

Система уравнений динамики с уравнением кинетики вида (6) была решена при нулевом значении параметра  $\alpha$ . Решение уравнения (6) при  $\varphi(x,0) = 0$  имеет вид  $\varphi = \sqrt{2\beta C_0 \varphi_0 \tau}$ . Из приведенного выражения видно, что время, необходимое для полного насыщения слоя шихты, определяется из соотношения

$$\tau = \frac{\varphi_0}{2\beta C_0} \quad (10)$$

и является конечной величиной.

При полном насыщении лобового слоя начинается другая стадия процесса – параллельный перенос образовавшегося хемосорбционного фронта. С другой стороны, как видно из уравнения (6), при  $\varphi \rightarrow 0$  скорость хемосорбции  $\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \rightarrow \infty$ . Это обстоятельство приводит к тому, что при переходе на характеристики, когда  $t' = \tau - x/w$ , начальные условия по концентрации не могут быть заданы уравнением мгновенного проскока. Смещенное на  $x/w$  время  $t'$  означает, что отсчет времени для данного сечения начинается с момента  $\tau = x/w$  подхода потока к сечению  $x$ .

Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -w \frac{\partial C}{\partial x}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \beta \frac{C}{\varphi/\varphi_0}, \end{cases} \quad (11)$$

с начальными условиями

$$\varphi(x,0) = C(x,0) = 0 \quad (12)$$

и граничными условиями

$$C(0, \tau) = C_0. \quad (13)$$

Для решения задачи (11) – (13) проведем преобразования, характерные для всех задач динамики [8]. Введем безразмерные переменные  $u = \frac{C}{C_0}$ ,  $v = \frac{\varphi}{\varphi_0}$ ,  $t = \frac{\beta C_0}{\varphi_0} \left( \tau - \frac{x}{w} \right)$ ,  $\xi = \frac{\beta x}{w}$ , и получим систему уравнений динамики в безразмерном виде

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial \xi}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{u}{v}. \end{cases} \quad (14)$$

Последняя система получена с учетом того, что с момента прихода фронта волны член  $\frac{\partial C}{\partial \tau}$  исключается [8].

Начальные условия для системы (14) определим из решения  $u = e^{-\frac{\xi}{v}}$  уравнения  $-\frac{du}{d\xi} = \frac{u}{v}$  с учетом того, что  $u(0, t) = 1$ . В выражении  $u = e^{-\frac{\xi}{v}}$  при  $v \rightarrow 0$  получим  $u \rightarrow e^{-\infty} \rightarrow 0$ .

Таким образом, пока фронт реакции не подошел к данному сечению, то есть при  $v = 0$ , будем иметь

$$u = v|_{x=l} = 0, \quad (15)$$

где  $l$  – определяет координаты фронта реакции.

Граничные условия примут вид

$$\begin{cases} u(0, t) = 1; \\ v(0, t) = \sqrt{2t}. \end{cases} \quad (16)$$

Решение системы (14) осуществляется в следующей последовательности. Во втором уравнении системы (14) введем переменную  $v$  под знак производной

$$\frac{\partial \left[ \frac{1}{2} v^2 \right]}{\partial t} = u,$$

а затем полученный результат продифференцируем по переменной  $\xi$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \left[ \frac{1}{2} v^2 \right]}{\partial t} \right) = \frac{\partial u}{\partial \xi}.$$

Последнее выражение, с учетом первого уравнения системы (14), можно записать в виде  $\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \left[ \frac{1}{2} v^2 \right]}{\partial t} \right) = -\frac{\partial v}{\partial \xi}$ .

Путем последующих преобразований и с учетом начальных условий (15)  $v(\xi, 0) = 0$  получим следующее выражение

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} = -1. \quad (17)$$

Интегрируя последнее выражение по  $v$  от  $v(0, t)$  до  $v$  и по переменной  $\xi$  от 0 до  $\xi$ , получим

$$v - v(0, t) = -\xi.$$

С учетом граничного условия (16)  $v(0, t) = \sqrt{2t}$  получится следующее простое решение

$$v(\xi, t) = \sqrt{2t} - \xi. \quad (18)$$

Значение безразмерной концентрации  $u$  находится из выражения

$$u = 1 - \frac{\xi}{\sqrt{2t}}. \quad (19)$$

Из решений (18) и (19) получим, что для конкретного сечения соотношение  $\frac{v}{v_0}$  является функцией времени

$$\frac{v}{v(0, t)} = u = 1 - \frac{\xi}{\sqrt{2t}}, \quad (20)$$

то есть соотношение Зельдовича (5) не выполняется.

Скорость сорбционной волны, вычисляемая из выражения

$$Q_v = \frac{1}{\sqrt{2t}},$$

обратно пропорциональна поглощению в лобовом слое.

Скорость концентрационной волны равна

$$Q_u = \frac{1-u}{\sqrt{2t}}.$$

При  $u \rightarrow 1$  скорость концентарционной волны  $Q_u \rightarrow 0$ , при  $u = 0$  скорости сорбционной и концентрационной волн равны  $Q_u = Q_v = \frac{1}{\sqrt{2t}}$ , то есть лобовые

границы сорбционного и концентрационного фронтов, движущихся с одинаковой скоростью, как следует при  $u = v = 0$ , совпадают.

При  $t = 0,5$  скорости сорбционной волны равны  $Q_v = 1$ ,  $Q_u|_{u=0} = 1$ .

Кроме того, при  $t = 0,5$   $v = u = 1 - \xi$ , то есть с этого момента и сорбционный и концентрационный фронты начинают совпадать. С момента  $t \geq 0,5$  начинается параллельное перемещение совпадающих сорбционного и концентрационного фронтов с постоянной скоростью.

Для нахождения распределения  $u$  и  $v$  по длине слоя проинтегрируем уравнение (17) в пределах от 1 до  $v$  и от  $\xi_{\text{тыл}}$  до  $\xi$ , получим

$$v - 1 = -\xi + \xi_{\text{тыл}} \quad \text{или} \quad 1 - v = \xi_{\text{тыл}} - \xi,$$

где  $\xi_{\text{тыл}}$  – координата тыловой части сорбционной волны.

С другой стороны  $Q_v = 1$  и  $\frac{d\xi_{\text{тыл}}}{dt} = Q_v = 1$ , откуда

$$\int_0^{\xi_{\text{тыл}}} d\xi_{\text{тыл}} = \int_{0,5}^t dt.$$

то есть  $\xi_{\text{тыл}} = t - \frac{1}{2}$ .

Таким образом функции распределения величин  $u$  и  $v$  по длине слоя примут вид:

$$v = t - \xi - \frac{1}{2}; \quad (21)$$

$$u = t - \xi - \frac{1}{2}. \quad (22)$$

Из выражений (21) и (22) видно, что  $u = v$  и параллельный перенос осуществляется при  $t \geq 0,5$ .

Если уравнение (17) интегрировать в пределах от 1 до 0 по  $v$  и от  $\xi$  до  $\xi_{\text{фронта}}$ , получим:  $\xi_{\text{тыл}} - \xi_{\text{фронта}} = 1$ , откуда  $\xi_{\text{фронта}} = t + \frac{1}{2}$ .

Из полученных решений системы уравнений динамики (11) – (13) видно, что существует фаза параллельного переноса фронта, причем эта стадия процесса не является асимптотическим приближением. Формирование фронтов осуществляется за конечное время  $t = 0,5$ , после чего и сорбционный и концентрационный фронт переносятся без изменений параллельно сами себе. Интересно, что на стадии параллельного переноса выходная кривая линейно зависит от времени. В рассматриваемой модели соотношение Зельдовича осуществляется без каких-либо оговорок после  $t \geq 0,5$ .

В данном случае конечное время отработки лобового слоя является фактором, определяющим появление в чистом виде «явления параллельного переноса» (рис. 1).

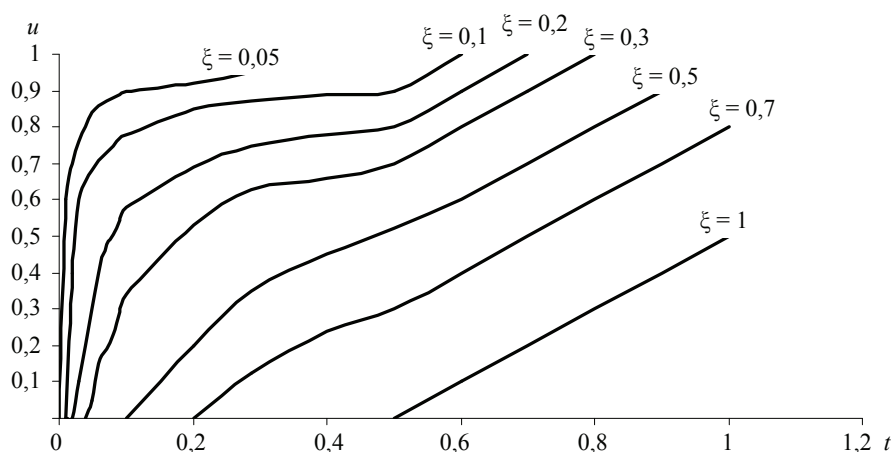


Рис. 1. График зависимости  $u(t)$  при различных значениях безразмерной продольной координаты  $\xi$

Решение системы уравнений динамики хемосорбции с уравнением кинетики (7) выполнено по методу [13]. Рассмотрим систему уравнений динамики

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -w \frac{\partial C}{\partial x}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \beta C \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2, \end{cases} \quad (23)$$

при начальных условиях  $C(x,0) = \varphi(x,0) = 0$  и граничных условиях  $C(0,\tau) = C_0$ .

Решение системы уравнений (23) достаточно громоздко, поэтому приведем лишь конечные результаты. Для величины  $v = \frac{\varphi}{\varphi_0}$  получено следующее решение

$$\ln t + t = \xi - \left[ \ln \frac{1-v}{v} - \frac{v}{1-v} \right]. \quad (24)$$

Для безразмерной концентрации  $u$  получено следующее решение

$$u = v \frac{t+1}{t}. \quad (25)$$

Учитывая выражения (24) и (25) получим

$$\xi - \left[ \ln \frac{1+t(1-u)}{ut} - \frac{ut}{1+t(1-u)} \right] = \ln t + t. \quad (26)$$

Уравнение (26) показывает, что  $u$  и  $v$  не совпадают, то есть и в этом случае соотношение Зельдовича (5) не выполняется. Но при больших  $t$  достаточно точно начинает выполняться уравнение Зельдовича. В этом случае конечное, асимптотическое решение для  $u$  имеет вид

$$\ln t + t = \xi - \left[ \ln \frac{1-u}{u} - \frac{u}{1-u} \right]. \quad (27)$$

Система уравнений динамики хемосорбции с уравнением массообмена (8) после замены переменных примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \xi} = -\frac{\partial v}{\partial t}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} = ue^{-\gamma v}. \end{cases} \quad (28)$$

Запишем начальные условия в безразмерном виде

$$u(\xi,0) = e^{-\xi}, \quad v(\xi,0) = 0. \quad (29)$$

Граничные условия для системы уравнений (28) имеют вид

$$u(0,t) = 1. \quad (30)$$

Решение системы (28) с начальными (29) и граничными (30) условиями имеет вид

$$t - t^* = \xi + \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\gamma u)^n - \gamma^n}{nn!}, \quad (31)$$



где  $t^* = \frac{e^\gamma - 1}{e^\gamma}$  – время, соответствующее полному поглощению лобового слоя.

Достаточно интересным, с практической точки зрения, представляется решение задачи динамики, когда скорость реакции пропорциональна концентрации выделяющегося вещества, что может иметь место в реакциях выделения кислорода при действии паров воды или гидролиза пероксикарбонатов [17, 18].

Рассмотрим систему уравнений динамики с уравнением массообмена (9) при  $n = 1$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -w \frac{\partial C}{\partial x}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\beta C_{CO_2} \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right). \end{cases} \quad (32)$$

Эти уравнения аналогичны уравнениям бимолекулярной реакции и могут быть применены для описания процесса выделения кислорода. Согласно работе [19] примем, что выделение кислорода пропорционально концентрации диоксида углерода. Таким образом, при решении задачи динамики выделения кислорода необходимо сначала решить задачу динамики поглощения диоксида углерода для нахождения его действующей концентрации.

В безразмерном виде система уравнений (32) примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial \xi}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -u_{CO_2} v. \end{cases} \quad (33)$$

Концентрация диоксида углерода вычисляется из выражения

$$u_{CO_2} = \frac{e^t}{e^t + e^\xi - 1}. \quad (34)$$

Выходная кривая выделения кислорода зеркальна по отношению к выходной кривой поглощения диоксида углерода, приведенной в [9].

Для уравнения  $\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\beta C_{O_2} \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2$  получено решение, которое на стадии параллельного переноса имеет вид:

$$\xi = \ln t + t + \left( \ln \frac{1-u}{u} - \frac{u}{1-u} \right); \quad (35)$$

$$\xi = \ln t + t - \left( \ln \frac{1-v}{v} + \frac{v}{1-v} \right). \quad (36)$$

Полученные решения уравнений динамики хемосорбции были использованы для обработки результатов динамики поглощения диоксида углерода и выделения (в случае РП) кислорода регенеративными веществами и поглотителями.

**Параметры и уравнения массообмена для некоторых РП и ХП**

Исследуемое вещество	Уравнения массообмена	Массообменные и емкостные характеристики
РП на основе супероксида калия, фракция 3...5,5 мм, плотность 1450 кг/м <sup>3</sup>	$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \tau} = \beta_1 C_1 e^{-\gamma \left( \frac{\varphi_1}{\varphi_{10}} \right)};$ $\frac{\partial \varphi_2}{\partial \tau} = -\beta_2 C_1 \left( \frac{\varphi_2}{\varphi_{20}} \right)^2$	$\varphi_{10} = 120 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_1 = 2 \text{ с}^{-1};$ $\gamma = 4;$ $\varphi_{20} = 210 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_2 = 3 \text{ с}^{-1}$
РП на основе супероксида натрия, фракция 3...5,5 мм, плотность 1650 кг/м <sup>3</sup>	$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \tau} = \beta_1 C_1 e^{-\gamma \left( \frac{\varphi_1}{\varphi_{10}} \right)};$ $\frac{\partial \varphi_2}{\partial \tau} = -\beta_2 C_1 \left( \frac{\varphi_2}{\varphi_{20}} \right)^2$	$\varphi_{10} = 100 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_1 = 0,83 \text{ с}^{-1};$ $\gamma = 5;$ $\varphi_{20} = 250 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_2 = 5,33 \text{ с}^{-1}$
Поглотитель на основе LiOH	$\partial \varphi_1 / \partial \tau = \beta_1 C_1 (1 - \varphi_1 / \varphi_{10})$	$\varphi_{10} = 197 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_1 = 3 \text{ с}^{-1}$
Поглотитель на основе Са(ОН) <sub>2</sub>	$\partial \varphi_1 / \partial \tau = \beta_1 C_1 (1 - \varphi_1 / \varphi_{10})$	$\varphi_{10} = 170 \text{ дм}^3/\text{дм}^3;$ $\beta_1 = 2,7 \text{ с}^{-1}$

Индексы 1 и 2 относятся к диоксиду углерода и кислороду соответственно.

### Результаты экспериментального определения параметров уравнений массообмена для некоторых регенеративных продуктов и поглотителей

Для определения параметров уравнений массообмена были проведены экспериментальные исследования поглощения углекислого газа и выделения кислорода регенеративными продуктами на динамической установке (аналогичной используемой в работе [21]), обеспечивающей продувку с постоянной скоростью газовой смеси с заданными параметрами (концентрацией углекислого газа, влажностью, температурой) через слой исследуемого вещества. В ходе экспериментов регистрировались концентрации углекислого газа и кислорода на выходе из слоя вещества. Полученные выходные кривые обрабатывались по методу Нелдера–Мида. В таблице приведены результаты обработки выходных кривых для некоторых регенеративных продуктов и поглотителей.

### Заключение

Получены аналитические решения систем нелинейных уравнений динамики хемосорбции с различного вида уравнениями, описывающими кинетику поглощения углекислого газа и выделения кислорода. Определены емкостные и массообменные характеристики некоторых регенеративных продуктов и поглотителей. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования систем регенерации различного типа.

#### Список литературы:

1. Мельников, А.Х. Основы хемосорбции / А.Х. Мельников. – М. : Оборонгиз, 1938. – 216 с.

2. Радушкевич, Л.В. Связь теории динамики адсорбции с термодинамикой неравновесных процессов / Л.В. Радушкевич // Кинетика и динамика физической адсорбции : тр. 3-й Всесоюз. конф. по теорет. вопросам адсорбции, Ленинград, 2–6 февр. 1971 г. / АН СССР, Науч. совет по синтезу, изучению и применению адсорбентов. – М., 1973. – С. 73–82.
3. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С.В. Пономарева. – М. : Физматлит, 2008. – 408 с.
4. Жуховицкий, А.А. Поглощение газа из тока воздуха слоем зернистого материала / А.А. Жуховицкий, А.И. Забежинский, А.Н. Тихонов // Журн. физ. химии. – 1945. – Т. 19, № 6. – С. 253–261.
5. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов. – М. : Наука, 2004. – 798 с.
6. Тодес, О.М. К вопросу о динамике сорбции на реальном зернистом сорбенте / О.М. Тодес, Я.М. Биксон // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 75, № 5. – С. 727.
7. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Лань, 2009. – 608 с.
8. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
9. Радушкевич, Л.В. Теория динамики сорбции на реальном зернистом адсорбенте / Л.В. Радушкевич // Докл. АН СССР. – 1947. – Т. LVII, № 5. – С. 371–374.
10. Розен, И.В. Определение коэффициента продольного перемешивания в недеформируемой пористой среде при наличии сорбции / И.В. Розен, Л.К. Цабек // Изв. АН СССР, Сер. Механика жидкости и газа. – 1972. – № 4. – С. 155–161.
11. Золотарёв, П.П. Приближенное решение задачи о внутренней диффузии в зерне сорбента для нелинейной изотермы / П.П. Золотарёв // Изв. АН СССР, Сер. Химия. – 1969. – № 3. – С. 711–713.
12. Рачинский В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и фронтальной хроматографии / В.В. Рачинский. – М. : Наука, 1964. – 137 с.
13. Панченков, Г.М. Кинетика химических реакций в потоке с полным перемешиванием / Г.М. Панченков // Журн. физ. химии. – 1964. – Т. 38, № 3. – С. 136–140.
14. Берман, Ю.А. Прикладная математика и механика / Ю.А. Берман, Р.Ф. Нагаев. – М. : Наука, 1969. – 224 с.
15. Динамика изотермической сорбции при резковыпуклой изотерме / Н.А. Жукова [и др.]. – Л. : Изд-во Ленингр. технолог. ин-та им. Ленсовета., 1976. – 14 с.
16. Кудрявцев, А.М. Обоснование выбора формально-кинетического уравнения хемосорбции применительно к частице сферической формы / А.М. Кудрявцев [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 1. – С. 59–65.
17. Мельников, А.Х. Исследование взаимодействия надперекиси калия с водяным паром и углекислым газом / А.Х. Мельников, Т.П. Фирсова, А.Н. Молодина // Журн. неорган. химии. – 1962. – Т. 7, № 6. – С. 1228–1229.
18. Фирсова, Т.П. О температуре плавления надперекиси калия / Т.П. Фирсова, А.Н. Молодина, Т.Г. Морозова // Изв. АН СССР, Сер. ОХН. – 1965. – № 9. – С. 1678–1679.
19. Математическое моделирование сорбционных процессов с обратными связями в системах, содержащих несколько аппаратов / А.В. Колбанцев [и др.]. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1983. – 25 с.
20. Трепнел, Б.М. Хемосорбция / Б.М. Трепнел. – М. : Изд-во иностр. лит., 1958. – 327 с.
21. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратурное оформление / Н.Ф. Гладышев [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 156 с.

## Dynamics of Chemical Adsorption with Regenerative Substances on the Basis of Superoxide of Alkaline Metals and Absorbers

S.V. Mishchenko, P.V. Balabanov, A.A. Krimshstein, S.V. Ponomarev

*Department "Automated Systems and Devices", TSTU (1); pav-balabanov@yandex.ru; Department "Transport Devices", Moscow Automobile and Road Institute (2)*

**Key words and phrases:** chemical adsorption; dynamics; mass transfer; mass transfer coefficient; superoxide.

**Abstract:** The paper presents analytical solutions to the equation of chemical adsorption dynamics; the parameters of the equations for the regenerative substances on the basis of superoxides and absorbers on the basis of hydroxides of alkaline metals are determined.

---

## Dynamik der Hemosorbtion von den regenerativen Stoffen auf Grund der Superoxiden der Alkalimetalle und der Aufsauger

**Zusammenfassung:** Es sind die analytischen Lösungen der Gleichungen der Dynamik der Hemosorbtion angeführt. Es sind die Parameter der Gleichungen für die regenerativen Stoffen auf Grund der Superoxiden und der Aufsauger auf Grund der Hydroxiden der Alkalimetalle bestimmt.

---

## Dynamique de la chimisorption par les matières de régénération à la base des superoxydes des métaux alcalins et des absorbants

**Résumé:** Sont citées les solutions analytiques des équations de la dynamique de la chimisorption, sont définis les paramètres des équations pour les matières de régénération à la base des superoxydes et des absorbants à la base des hydroxides des métaux alcalins.

---

**Авторы:** *Мищенко Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и сертификация», ректор, ГОУ ВПО «ТГТУ»; *Балабанов Павел Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ»; *Кримштейн Анатолий Абрамович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортные установки», ГОУ ВПО «МАДИ»; *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Коновалов Виктор Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».