

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 6, Number 420 (2016), 178 – 184

B. M. Kaldybaeva¹, A. E. Khusanov¹, E. A. Dmitriev², D. S. Sabyrkhanov¹, A. Zh. Abilmagzhanov³

¹M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan,

²Mendeleev Russian University of Chemical Engineering, Moscow, Russia,

³Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry. D. Sokolskogo, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: husanov@inbox.ru, kaldybaeva.b@mail.ru

MODELLING WITH SIMULTANEOUS PHASE TRANSFER CHEMISORPTION OF HYDROGEN SULFIDE AND CARBON DIOXIDE IN THE CHEMISORPTION APPARATUS

Abstract. In this article, we consider the case very rapid irreversible chemical reaction in the liquid phase. From the ratio of velocities of physical and chemical absorption can obtain an expression for the accelerating factor β , which shows how many times the resistance of the film decreases due to a chemical reaction, this value is also called the criterion Hatta - Ha. In the comparison of mass transfer coefficients held in chemisorption calculated based on the model proposed by Higbee. This indicates that if the definition of the coefficient k_x is made on the basis of the experimentally determined value K_X , the choice of transport theory is not essential. However, in the absence of experimental data, it becomes important on the basis of a theory of the calculation is the mass transfer coefficient of the physical absorption.

Key words: chemisorption unit, ceramic membranes, mass transfer in the liquid phase, chemical absorption, mathematical modeling, mass transfer, liquid, gas, physical absorption.

УДК 628.336.6

Б. М. Калдыбаева¹, А. Е. Хусанов¹, Е. А. Дмитриев²,
Д. С. Сабырханов¹, А. З. Абиьмагжанов³

¹Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан,

²Российский химико-технологический университет им. Д. Менделеева, Москва, Россия,

³Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д. Сокольского, Алматы, Казахстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ХЕМОСОРБЦИИ СЕРОВОДОРОДА И ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ХЕМОСОРБЦИОННОМ АППАРАТЕ

Аннотация. В статье рассматривается случай очень быстрой необратимой химической реакции в жидкой фазе. Из отношения величин скоростей физической и химической абсорбции можно получить выражение для ускоряющего фактора β , который показывает, во сколько раз сопротивление пленки уменьшается за счет химической реакции, эту величину также называют критерием Хатта – Ha. В работе проведено сравнение коэффициентов массоотдачи при хемосорбции рассчитанных на основе модели предложенной Хигби. При этом указывается, что если определение коэффициента k_x производится на основе экспериментально найденного значения k_x , то выбор теории переноса не существен. Однако в случае отсутствия экспериментальных данных, становится важным на основе какой теории вести расчет коэффициента массоотдачи при физической абсорбции.

Ключевые слова: хемосорбционный аппарат, керамические мембраны, массоотдача в жидкой фазе, химическая абсорбция, математическое моделирование, массообмен, жидкость, газ, физическая абсорбция.

Введение. Среднее время пребывания в аппарате пузырьков газа, в случае проектирования хемосорбера по типу мембранного модуля, достаточно мало. Считая структуру потока в аппарате близкой к модели идеального вытеснения, среднее время пребывания можно рассчитать как $t_{np} = \frac{l}{2\omega}$. Если, длина керамических мембран стандартная – 0,8 м и скорость жидкости 1–3 м/с, то время пребывания составит 0,1–0,4 секунды. Этого времени может быть недостаточной для эффективного протекания физической абсорбции, однако при хемосорбции время реакции между газом и жидкостью имеют порядок около 0,01 с [1]. Мембранные аппараты могут быть использованы и в качестве химических реакторов. С точки зрения эффективности массообменных процессов в мембранном модуле, наиболее перспективным является рассмотрение хемосорбционных процессов при достаточно быстрой химической реакции и существующих теорий хемосорбции.

Методы исследования. Можно выделить два направления в развитии теории хемосорбции, которые исходят из двух моделей переноса вещества. Первое направление основано на пленочной теории Уитмена и развито в работах Хатта [2] и Ван Кревелина [3-5]. Второе направление базируется на пенетрационной теории и рассмотрении нестационарного процесса абсорбции при непрерывном обновлении поверхности контакта фаз. Это направление развито в основном в работах Данквертса [6-8]. При этом в ряде практически важных случаев результаты, полученные по различным моделям, фактически совпадают.

Рассматривается случай очень быстрой необратимой химической реакции [2] в жидкой фазе. При этом считается, что процесс протекает в тонкой пленке жидкости толщиной δ . В ходе процесса компонент A проникая через границу раздела растворяется в жидкости и реагирует с B . Образовавшийся при этом продукт D диффундирует по направлению к объему жидкости. Концентрация B у поверхности раздела снижена, что вызывает его диффузию из объема фазы к поверхности. Поскольку химическая реакция быстрая компонент B быстро расходуется, поэтому компоненту A требуется пройти часть толщины пленки, чтобы встретиться с B . Таким образом внутри пленки, образуется зона химической реакции, смещающаяся по направлению от границы раздела фаз. Конечное положение зоны реакции определяется условием равенства скоростей диффузии компонентов A и B .

Результаты исследования. Из отношения величин скоростей физической и химической абсорбции можно получить выражение для ускоряющего фактора β , который показывает, во сколько раз сопротивление пленки уменьшается за счет химической реакции, эту величину также называют критерием Хатта – На [6,3-9]:

$$\beta = Ha = \frac{N'_A}{N_A} = \frac{k'_x}{k_x} = 1 + \frac{D_A C_{B0}}{D_B v_b C_{Ai}} \quad (1)$$

Выражение (1) применимо только к очень быстрой необратимой реакции второго порядка.

Так как согласно пленочной теории коэффициент массоотдачи равен $k_x = \frac{D_A}{\delta}$, то окончательно для скорости хемосорбции получен:

$$(N'_A)_{y=0} = k_x Ha \left[(C_{Ai} - C_{AP}) - \frac{(C_{A0} - C_{AP})}{ch(b\delta)} \right] \quad (2)$$

Эти формулы были впервые получены Хатта [1,10] для необратимой реакции первого порядка (т.е. при допущении $C_{AP}=0$). В дальнейшем, в работах [3-5], этот вывод был распространен на обратимые и необратимые реакции высших порядков. Обозначая выражение в скобках через ΔC и преобразуя его к виду:

$$\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0}) + \left[(C_{A0} - C_{AP}) \left(1 - \frac{1}{ch(b\delta)} \right) \right] \quad (3)$$

При обратимой реакции и большой скорости в объеме жидкости должно устанавливаться химическое равновесие, тогда $C_{A0} = C_{AP}$ и $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$, а при очень медленной $b\delta \rightarrow 0$ (так как $k_p \rightarrow 0$), следовательно $ch(b\delta) = 1$, и $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$.

При необратимой реакции и большой скорости: $C_{AP} = 0$, при этом $C_{A0} \rightarrow 0$ и $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$, а при очень медленной: $b\delta \rightarrow 0$ (т.к. $k_p \rightarrow 0$), $ch(b\delta) = 1$, $C_{AP} = 0$, $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$.

Таким образом, во всех предельных случаях, величина $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$. В случае реакции средней скорости точно задаться величиной C_{AP} нельзя, однако, поскольку $C_{A0} > C_{AP}$, слагаемое в квадратных скобках в выражении (3) увеличивает ΔC . Поэтому с некоторым запасом можно использовать выражение $\Delta C = (C_{Ai} - C_{A0})$ [8].

Следовательно, во всех рассмотренных случаях, для определения скорости хемосорбции можно применять выражение:

$$N'_A = k'_x(C_{Ai} - C_{A0}) = k_x Ha(C_{Ai} - C_{A0}). \quad (4)$$

Теперь рассмотрим профиль распределения концентраций. При $\gamma = 0$ (т.е. для очень медленной реакции) профиль концентраций описывается прямой линией, как и при физической абсорбции.

С увеличением скорости реакции снижение концентрации компонента в пленке усиливается. Также можно ориентировочно определить, какое количество компонента А реагирует в пленке толщиной δ :

$$\eta = \frac{(N'_A)_{y=\delta}}{(N'_A)_{y=0}} = \frac{\left(\frac{dC_A}{dy}\right)_{y=\delta}}{\left(\frac{dC_A}{dy}\right)_{y=0}} = \frac{1}{th(\gamma)}. \quad (5)$$

Величина η показывает, какая часть компонента А проходит через слой δ , не вступая в реакцию. Зависимость η от γ представлена в работе [8].

Расчеты показывают, что при высоких скоростях реакции ($\gamma > 5$) через слой проходит не более 2 % поглощаемого вещества, в то время как при низких скоростях ($\gamma < 0.3$) почти вся масса вещества диффундирует через слой, не вступая в реакцию.

Величина коэффициента отдачи в жидкой фазе зависит от критерия Хатта. Поскольку $Ha = \frac{k'_x}{k_x}$, то из результатов работы [9] следует, что:

$$k'_x = k_x Ha = k_x \frac{a\delta}{th(a\delta)} = k_x \frac{\gamma}{th(\gamma)}. \quad (6)$$

Выражение $\frac{\gamma}{th(\gamma)} = Ha$ всегда больше 1 и возрастает с увеличением γ .

Поэтому коэффициент массоотдачи при хемосорбции всегда больше чем при физической абсорбции и его численное значение, тем выше, чем выше скорость реакции. При выводе формул для расчета коэффициента массоотдачи обычно выделяют три области значений γ [2-9]:

- область быстрых реакций $\gamma > 5$.
- область медленных реакций $0,3 < \gamma < 5$.
- область очень медленных реакций $\gamma < 0.3$.

В области быстрых реакций при $\gamma > 5$ величина $th(\gamma) \rightarrow 1$, поэтому, согласно выражению (6) коэффициент массоотдачи:

$$k'_x = k_x \gamma = k_x \delta \sqrt{\frac{k_p}{D_A}}. \quad (7)$$

С учетом выражения $k_x = \frac{D_A}{\delta}$ для реакции псевдо-первого порядка:

$$k'_x = \sqrt{k_p D_A} = \sqrt{k_2 C_B D_A}, \quad (8)$$

где k_2 – константа скорости реакции второго порядка. Выражение (8) указывает на то, что в случае быстрой реакции коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при хемосорбции не зависит от гидродинамических условий процесса. Этот факт объясняется тем, что реакция большой скорости протекает непосредственно вблизи поверхности раздела фаз и характер движения глубинных слоев жидкости на ее протекание не влияет. Следует отметить, что полученное выражение имеет большое практическое значение, так как лежит в основе многих химических методов определения удельной поверхности контакта.

В области медленных реакций нельзя допустить никаких приближений и коэффициент массоотдачи следует определять по выражению (6), поскольку в этом случае зона реакции может распространяться и в основную массу жидкости. Однако можно отметить, что уже при $\gamma > 2,5$ значение $th(\gamma)$ близко к единице, поэтому в таких случаях, с некоторой погрешностью можно использовать выражение (8).

В случае очень медленной реакции реакция почти полностью будет протекать в объеме жидкости. При этом, поскольку $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\gamma}{th(\gamma)} = 1$, значение коэффициента массоотдачи при хемосорбции приближается к значению коэффициента массоотдачи при физической абсорбции.

Как отмечалось, рассмотренные нами зависимости применимы только к реакциям первого порядка по веществу А.

Во всех представленных выше зависимостях предполагается что вещество B дано в избытке и $C_B = \text{const}$. В работах [3-5] были проведены исследования влияния концентрации C_B на соотношение величин $\frac{k'_x}{k_x}$ и $\frac{\sqrt{k_2 C_B D_A}}{k_x}$ (в качестве C_B используется средняя величина). Исследования проводились на системе диоксид углерода – гидроксид натрия. Анализ результатов показывает, что при малых скоростях реакции, вне зависимости от концентрации B , величина $\frac{k'_x}{k_x} \approx 1$ и процесс близок к физической абсорбции. С увеличением скорости реакции величина $\frac{k'_x}{k_x}$ становится примерно равной $\frac{\sqrt{k_2 C_B D_A}}{k_x}$, что указывает на возможность применения выражения (8) для расчета коэффициента массоотдачи. В этой области процесс лимитируется скоростью химической реакции. При дальнейшем увеличении скорости величина $\frac{k'_x}{k_x}$ принимает постоянное значение близкое к $\frac{C_{B0}}{v_b C_{Ai}}$, при этом процесс лимитируется переносом вещества B к зоне реакции.

Исходя из сказанного выше, выражение (8) без серьезной ошибки можно применять в диапазоне:

$$5 < \frac{\sqrt{k_2 C_B D_A}}{k_x} < \left(\frac{C_B}{v_b C_{Ai}} \right). \quad (9)$$

Как отмечалось, все представленные выше выводы основаны на положениях пленочной модели переноса вещества. Однако указывалось, что для описания массообмена при мембранном аппарате более подходящей является пенетрационная модель. Поэтому представляет большой интерес сравнение данных зависимостей с зависимостями, полученными на основе пенетрационной модели. Отсюда следует, что коэффициент массоотдачи может быть рассчитан по уравнению:

$$k'_x = \frac{N'_A}{C_{Ai}} = \sqrt{\frac{D_A}{k_p}} \left[\sqrt{\frac{k_p}{\pi \theta}} e^{-k_p \theta} + \left(k_p + \frac{1}{2\theta} \right) \text{erf}(\sqrt{k_p \theta}) \right]. \quad (10)$$

Решение данного уравнения было дано Данквертсом [7] на основе метода преобразований Лапласа. При этом рассматривалась жидкость полу-бесконечной толщины в начальный момент свободная от поглощаемого газа.

Так же предполагается, что концентрация компонента A на границе раздела фаз C_A^* постоянна и равна равновесной величине.

Анализ показывает, что в случае малых скоростей реакции, когда $k_p \rightarrow 0$ выражение в квадратных скобках (10) стремится к значению $2 \sqrt{\frac{k_p}{\pi \theta}}$, следовательно, в этом случае, выражение для коэффициента массоотдачи имеет вид $k'_x = 2 \sqrt{\frac{D_A}{\pi \theta}}$, что совпадает с полученным Хигби для физической абсорбции. При высоких скоростях химической реакции величина $(\text{erf}(\sqrt{k_p \theta}) \rightarrow 1$, а $k_p \gg 1/\theta$, поэтому $k'_x = \sqrt{k_p D_A}$.

В работе [11] на основе комбинирования уравнения (10) с выражением для коэффициента массоотдачи при физической абсорбции (7) было получено выражение для критерия Хатта:

$$\text{Ha} = \left(\gamma + \frac{\pi}{8\gamma} \right) \text{erf} \left(\frac{2\gamma}{\sqrt{\pi}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{4\gamma^2}{\pi} \right). \quad (11)$$

Авторами также было проведено сравнение значений рассчитанных на основе уравнений (11) и (6). Из результатов сравнения можно сделать вывод, что как пленочная, так и пенетрационная теории дают фактически одинаковые результаты, поэтому с практической точки зрения не важно какая из моделей кладется в основу расчета.

В работе [12] проведено сравнение коэффициентов массоотдачи при хемосорбции рассчитанных на основе трех моделей массопереноса – пленочной, пенетрационной и пленочно пенетрационной. Установлено, что все три модели предсказывают практически одинаковое влияние химической реакции на параметры массообмена. При этом указывается, что если определение коэффициента k'_x производится на основе экспериментально найденного значения k_x , то выбор теории переноса не

существенен. Однако в случае отсутствия экспериментальных данных, становится важным на основе какой теории вести расчет коэффициента массоотдачи при физической абсорбции.

По предложенной теории Хигби, поверхность раздела газ-жидкость состоит из небольших элементов жидкости, которые непрерывно подводятся к поверхности из объема жидкости и наоборот уходят в объем за счет движения самой жидкой фазы. Каждый элемент жидкости, пока находится на поверхности, можно рассматривать как неподвижный, а концентрацию растворенного газа в элементе- всюду равной концентрации в объеме жидкости, когда элемент подводится к поверхности. В таких условиях абсорбция осуществляется при нестационарной молекулярной диффузии в различных элементах поверхности жидкости. При рассмотрении массопереноса из газового пузырька Хигби принял допущение, что все поверхностные элементы находятся на поверхности в течение одинакового количества времени, а именно

$$\theta = \frac{d}{\omega}, \quad (12)$$

где d – диаметр пузырька; ω – скорость жидкой фазы.

На основе вышеизложенного, для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе Хигби предложил следующее уравнение:

$$k_x = 2 \sqrt{\frac{D_{жс}}{\pi \theta}}, \quad (13)$$

где $D_{жс}$ – коэффициент молекулярной диффузии жидкости, м²/с;

Рассматривая зависимость времени контакта фаз от структурных характеристик газожидкостного слоя, подставляя значение (12) в (13) получим:

$$k_x = 2 \sqrt{\frac{D_{жс} \omega}{\pi d}}. \quad (14)$$

Уравнение может быть решено после определение диаметра пузырьков в хемосорбере, которую мы определили в своих предыдущих исследованиях [13, 14]. Подставляя в значение диаметра пузырька, получим уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе.

Тогда, окончательно будем иметь из отношения величин скоростей физической и химической абсорбции выражения для ускоряющего фактора β , который показывает, во сколько раз сопротивление пленки жидкости уменьшается за счет химической реакции, эту величину также называют критерием Хатта. Подставляя в (1) значения k'_x в уравнении (8) и значения k_x в уравнении (14) получим:

$$\beta = Ha = \frac{k'_x}{k_x} = \frac{1}{2} B_{жс} \sqrt{\frac{\pi d k_2 C_B D_A}{D_{жс} \omega}}, \quad (15)$$

где $B_{жс}$ – опытный коэффициент, который определяется после обработки и сравнения с экспериментальными данными.

Обсуждение результатов. Подводя итоги рассмотрению массообмена с химической реакцией можно сделать следующие выводы. Существующие теории хемосорбции, хотя и не являются достаточно полными, но дают достаточно надежные результаты для случая быстрых необратимых реакций первого и псевдо-первого порядка. При этом фактически все модели переноса предсказывают сходные значения для коэффициента массоотдачи при хемосорбции. Однако в силу недостатков свойственных существующим моделям переноса для точного предсказания k'_x необходимо иметь экспериментальные данные по k_x . При условиях, определяемых неравенством (2.79), коэффициент массоотдачи может быть рассчитан по выражению $k'_x = \sqrt{k_p D_A} = \sqrt{k_2 C_B D_A}$, которое согласуется как с пленочной, так и пенетрационной моделями. Выражение указывает, что в случае быстрой химической реакции коэффициент массоотдачи не зависит от гидродинамических условий в ядре потока и определяется скоростью реакции и скоростью диффузии поглощаемого компонента.

Выводы. Было проведено сравнение значений рассчитанных на основе уравнений (11) и (6). Из результатов сравнения можно сделать вывод, что как пленочная, так и пенетрационная теории дают фактически одинаковые результаты, поэтому с практической точки зрения не важно, какая из моделей кладется в основу расчета.

Проведено сравнение коэффициентов массоотдачи при хемосорбции рассчитанных на основе трех моделей массопереноса – пленочной, пенетрационной и пленочно пенетрационной. Установлено, что все три модели предсказывают практически одинаковое влияние химической реакции на параметры массообмена. При этом указывается, что если определение коэффициента k'_x производится на основе экспериментально найденного значения k_x , то выбор теории переноса не существен. Однако в случае отсутствия экспериментальных данных, становится важным на основе какой теории вести расчет коэффициента массоотдачи при физической абсорбции.

Источник финансирования исследований. Статья подготовлена на основе гранта Министерство образования и науки Республики Казахстан по бюджетной программе “Грантовое финансирование научных исследований”, по приоритету «Возобновляемые источники энергии (ветро-и гидроэнергетика, биотопливо и фотоэлектричество)» по теме: «Разработка технологии и моделирование процесса микробиологической очистки биогаза с целью получения высококонцентрированного метана из возобновляемых источников энергии» на 2013–2015 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Астарита Дж. Массопередача с химической реакцией / Пер. с англ. М. И. Балашова. – Л.: Химия, 1971. – 224 с.
- [2] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Kinetics of gas-liquids reactions. – Part I. General theory // Rec. Trav. Chim. – 1948. – Vol. 67. – P. 563.
- [3] Hatta S. On the absorption velocity of gases by liquids // Tech. Repts. Tohoku Imp. Univ. – 1932. – Vol. 10. – P. 119-128.
- [4] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Graphical design of gas-liquid reactors // Chem. Eng. Sci. – 1953. – Vol. 2, N 4. – P. 145-156.
- [5] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Micro- and macro- kinetics: general introduction to the symposium // Chem. Eng. Sci. – 1958. – Vol. 8, N 1-2. – P. 5-17.
- [6] Данквертс П.В. Газо-жидкостные реакции / Пер. с англ. И. А. Гильденблата. – М.: Химия, 1973. – 296 с.
- [7] Danckwerts P.V. Absorption by simultaneous diffusion and chemical reactions // Trans. Faraday Soc. – 1950. – Vol. 46. – P. 300-312.
- [8] Хоблер Т. Массопередача и абсорбция. – М.: Химия, 1964. – 337 с.
- [9] Yoshida F., Miura Y. Gas absorption in agitated gas-liquid contactors // Ind. Eng. Chem. – 1963. – Vol. 2, N 4. – P. 263-277.
- [10] Valentine F.H.H. Absorption in gas-liquid dispersions: Some aspects of bubble technology. – L.: E.& F. Spon. Ltd, 1967. – 212 p.
- [11] Yoshida F., Miura Y. Effective interfacial area in packed columns for absorption with chemical reaction // AIChE J. – 1963. – Vol. 9, N 3. – P. 331-343.
- [12] Chem-Jung H., Chiang-Hai K. General mathematical model for mass transfer accompanied by chemical reaction // AIChE J. – 1963. – Vol. 9, N 2. – P. 161-173.
- [13] Trushin A.M., Dmitriev E.A., Nosyrev M.A., Khusanov A.E., Kaldybaeva B.M. General Method of Measurement of Velocity of Laminar Constrained Motion of Spherical Solid and Gas Particles in Liquids // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 47, N 6. – P. 730-733. – DOI: 10.1134/S0040579513060110 © Pleiades Publishing, Ltd., 2013. Thomson Reuters Impact Factor 0.673 Springer.
- [14] Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E., Dmitriev E.A., Sabyrkanov D.S., Korganbaev B.N. Results of experimental researches the energy-saving technology of biogas purification for the purpose of obtaining highly concentrated methane // Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – Almaty, 2015. – Vol. 5, N 303(2015). – P. 78-85.

REFERENCES

- [1] Astarita John. Himichekoy mass transfer with reaction / Per. from English. Balashov M.I. A.: Chemistry, 1971. 224 p. (in Russ).
- [2] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Kinetics of gas-liquids reactions. Part I. General theory // Rec. Trav. Chim. 1948. Vol. 67. P. 563 (in Eng).
- [3] Hatta S. On the absorption velocity of gases by liquids // Tech. Repts. Tohoku Imp. Univ. 1932. Vol. 10. P. 119-128 (in Eng).
- [4] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Graphical design of gas-liquid reactors // Chem. Eng. Sci. 1953. Vol. 2, N 4. P. 145-156 (in Eng).
- [5] Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J. Micro- and macro- kinetics: general introduction to the symposium // Chem. Eng. Sci. 1958. Vol. 8, N 1-2. P. 5-17 (in Eng).
- [6] Danckwerts P.V. Gas-liquid reactions / Per. from English I. A. Gildenblata. M.: Chemistry, 1973. 296 p. (in Russ).
- [7] Danckwerts P.V. Absorption by simultaneous diffusion and chemical reactions // Trans. Faraday Soc. 1950. Vol. 46. P. 300-312 (in Eng).
- [8] Hobler T. mass transfer and absorption. M.: Chemistry, 1964. 337 p. (in Russ).
- [9] Yoshida F., Miura Y. Gas absorption in agitated gas-liquid contactors // Ind. Eng. Chem. 1963. Vol. 2, N 4. P. 263-277 (in Eng).
- [10] Valentine F.H.H. Absorption in gas-liquid dispersions: Some aspects of bubble technology. L.: E.& F. Spon. Ltd, 1967. 212 p. (in Eng).
- [11] Yoshida F., Miura Y. Effective interfacial area in packed columns for absorption with chemical reaction // AIChE J. 1963. Vol. 9, N 3. P. 331-343 (in Eng).
- [12] Chem-Jung H., Chiang-Hai K. General mathematical model for mass transfer accompanied by chemical reaction // AIChE J. 1963. Vol. 9, N 2. P. 161-173 (in Eng).

[13] Trushin A.M., Dmitriev E.A., Nosyrev M.A., Khusanov A.E., Kaldybaeva B.M. General Method of Measurement of Velocity of Laminar Constrained Motion of Spherical Solid and Gas Particles in Liquids / Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Vol. 47, N 6. P. 730–733. DOI: 10.1134/S0040579513060110 © Pleiades Publishing, Ltd., 2013. Thomson Reuters Impact Factor 0.673 Springer.(inEng).

[14] Kaldybaeva B.M., Khusanov A.E., Dmitriev E.A., Sabyrkhanov D.S., Korganbaev B.N. Results of experimental researches the energy-saving technology of biogas purification for the purpose of obtaining highly concentrated methane // Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Almaty, 2015. Vol. 5, N 303(2015). P. 78-85 (in Eng).

Б. М. Калдыбаева¹, А. Е. Хусанов¹, Е. А. Дмитриев², Д. С. Сабырханов¹, А. З. Абиьмагжанов³

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент, Қазақстан,

²Д. Менделеев атындағы Ресей химия-технологиялық университеті, Москва, Ресей,

³Д. Сокольский атындағы отын, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан

ХЕМОСОРБЦИЯЛЫҚ АППАРАТТА КҮКІРТ СУТЕГІ ЖӘНЕ КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗДАРЫНЫҢ БІР УАҚЫТТА ХЕМОСОРБЦИЯЛАНУ КЕЗІНДЕГІ ФАЗАЛАР АРАЛЫҚ АЛМАСУДЫ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Мақалада сұйық фазадағы қайтымсыз өте жылдам химиялық реакция қарастырылып отыр. Физикалық және химиялық абсорбция жылдамдықтарының шамаларының қатынасынан үдетуші фактор β мәнін алуға болады, ол химиялық реакция нәтижесінде сұйық қабыршағының кедергісі неше есе азайатындығын көрсетеді, бұл шаманы сонымен бірге Хатта – (Ha) критеріі деп атайды. Бұл жұмыстың нәтижесі бойынша хемосорбция кезінде Хигби ұсынған модель негізінде массаалмасу коэффициенттерінің мәндеріне салыстыру жүргізілген. Соның нәтижесінде, егер k'_x коэффициентінің мәні k_x тәжірибелік жолмен анықталған нәтиже бойынша анықталса, онда ауысу теориясын таңдаудың мәні елеулі емес екендігіне көңіл бөлінеді. Егер тәжірибелік мәліметтер жоқ болса, онда физикалық абсорбция кезінде қандай теория қолдану мәнінің маңызы жоғарылайтындығы атап көрсетілген.

Түйін сөздер: хемосорбциялық аппарат, керамикалық мембрана, сұйық фазадағы массаберу, химиялық абсорбция, математикалық модельдеу, массаалмасу, сұйық, газ, физикалық абсорбция.

Сведения об авторах:

Калдыбаева Ботагөз Мырзахметовна – PhD докторант по специальности технологические машины и оборудование. Занимается разработкой и расчетом совмещенных процессов и многофункциональных массообменных аппаратов и проведение теоретических и экспериментальных исследований в области массообменных процессов. Имеет 5 патентов и является автором 52 публикаций в различных изданиях, включая учебники и учебные пособия.

Хусанов Алишер Евадиллович – кандидат технических наук. Научный задел - теоретические и экспериментальные исследования в области массообменных процессов, разработка математической модели очистки биогаза в микробарботажном аппарате на основе теоретической и экспериментальной информации, полученной в модельных исследованиях, разработка пылегазоочистных и тепломассообменных аппаратов с активной гидродинамикой. Опубликовано 106 научных работ, получены 6 патентов, предварительных и инновационных патентов РК.

Сабырханов Дархан Сабырханович – доктор технических наук, профессор. Научное направление - закономерности изотропной турбулентности и вихревого движения взаимодействующих потоков для создания теоретических основ массообменных процессов. Имеет более 50 авторских свидетельств и патентов и является автором более чем 300 публикаций в различных изданиях, включая учебники и монографии. Под руководством Сабырханова Д. С. подготовлено 8 кандидатов наук и 1 доктор наук.

Дмитриев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор. Научное направление - массообменные процессы, гидродинамика и массообмен, энерго- и ресурсосбережение, разработка методов и установки очистки водноорганических смесей на основе принципа интеграции процессов химической технологии, которые могут быть использованы при разработке технологии. Опубликовано 134 научных работ, получены 24 патента, предварительных патентов РФ, касающихся темы проекта.

Абиьмагжанов Арлан Зайнуталлаевич – кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора Института топлива, катализа и электрохимии им. Д. В. Сокольского. Имеет более 10 патентов и является автором 50 публикаций в различных изданиях, включая учебники и учебные пособия.