

А. Г. Лаптев, Р. Я. Исхакова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ СОРБЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ УСТАНОВОК ВОДОПОДГОТОВКИ

Ключевые слова: очистка сточных вод, адсорбция, равновесие, карбонатный шлам, математические модели.

В статье рассматриваются методы математического и физического моделирования процесса адсорбции очистки сточных вод промышленных предприятий, связанных с химической технологией. Для очистки сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ) и математического моделирования процесса адсорбции разработано и экспериментально исследовано применение сорбционного материала в виде отходов с установок водоподготовки, которым является шлам после осветлителей на тепловых электрических станциях. Представлены математические модели, как для инженерных расчетов, так и численного исследования процесса адсорбции. Записана система дифференциальных уравнений в частных производных баланса массы компонента, кинетики адсорбции с условиями равновесия (изотермы адсорбции). Для инженерных расчетов адсорбера представлено уравнение массопередачи и материального баланса, где искомой величиной является поверхность адсорбента. Отмечено, что для применения данных моделей необходимы экспериментальные данные по кинетике адсорбции и равновесию. В экспериментальной части работы исследования проведены с использованием шлама водоподготовительной установки Казанской ТЭЦ – 1. Установлены технические и физико-химические характеристики материала: реакция среды, насыпная плотность материала, зольность, влагоемкость. Получены гранулы шлама, обработанные связующими, которые используются при получении изотерм адсорбции. Получены экспериментальные данные по извлечению лаурилсульфата натрия, являющимся распространенным анионным ПАВ, попадающим в сточные воды различных предприятий. Выявлена и представлена графически зависимость снижения поверхностного натяжения раствора на границе раздела фаз – воздух и раствор с увеличением концентрации лаурилсульфата натрия. Получены изотермы адсорбции для разработанных сорбционных материалов, которые относятся к первому типу по классификации Брунауэр-Эмметт-Теллера. Полученные экспериментальные данные могут использоваться как при численном моделировании адсорбции ПАВ, так и в инженерных методах расчета аппаратов очистки сточных вод.

A. G. Laptev, R. Ya. Iskhakova

MODELING OF WASTEWATER TREATMENT FROM SURFACTANTS USING SORBENTS BASED ON WASTE FROM WATER TREATMENT PLANTS

Key words: wastewater treatment, adsorption, equilibrium, carbonate sludge, mathematical models.

Methods of mathematical and physical modeling of the process of adsorption of wastewater treatment of industrial enterprises related to chemical technology are considered. For wastewater treatment from anionic synthetic surfactants and mathematical modeling of the adsorption process, the use of sorption material in the form of waste from water treatment plants, which are sludge after clarifiers at thermal power plants, has been developed and experimentally investigated. Mathematical models are presented for both engineering calculations and numerical investigation of the adsorption process. A system of partial differential equations is written for the balance of the mass of the component, the kinetics of adsorption with equilibrium conditions (isotherms of adsorption). For engineering calculations of the adsorbent, the equation of mass transfer and material balance is presented, where the desired value is the surface of the adsorbent. It is noted that experimental data on adsorption kinetics and equilibrium are needed to apply these models. The carbonate sludge of Kazan CHPP – 1 was used for experimental studies. The physicochemical characteristics of the sludge were determined: bulk density, ash content, moisture capacity and pH of the medium. Experimental data have been obtained on the extraction of sodium lauryl sulfate, which is a surfactant entering wastewater from various enterprises. A pattern of decreasing surface tension at the interface between air and solution phases has been established with an increase in the concentration of the extracted surfactant component. A graphical dependence of the surface tension on the concentration of sodium lauryl sulfate in solution is presented. Sorption isotherms for the proposed sorbent have been obtained, which belong to the first type according to the Brunauer-Emmett-Teller classification. Experimental data can be used both in numerical modeling of surfactant adsorption and in engineering methods for calculating wastewater treatment plants.

Введение

Сточные воды промышленных предприятий в зависимости от технологических процессов могут содержать разнообразные загрязняющие вещества. Одними из таких веществ являются поверхностно-активные вещества (ПАВ) в производстве моющих средств, в химической и пищевой промышленности, а также в фармацевтике. Отсюда следует важная задача очистки сточных вод от различных ПАВ.

Для решения задач очистки сточных вод от вредных примесей наибольшее применение получил процесс адсорбции [1,2] с применением сорбентов из различных материалов, например, полимерные сорбенты [3], цеолиты [4], различные активные угли [5] и другие материалы рассмотренные ниже.

Известно [6,7], что ПАВ снижают поверхностное напряжение воды. ПАВ могут образовывать мицеллы-структуры, внутри которых гидрофильные части обращены к водной среде, а гидрофобные –

внутри, что позволяет эффективно извлекать загрязнения с поверхностей [8]. Важное значение имеет выбор сорбционных материалов, от свойств которых зависит эффективность разделения, т.е. эффективность очистки сточных вод от ПАВ [9,10].

Наиболее распространенным сорбентом является активный уголь [11-13], который обладает высокой разделительной способностью широкого класса компонентов, включая ПАВ [14-16]. Используются также ионообменные смолы (анионные и катионные), применяются цеолиты, алюмосиликатные материалы, полимерные сорбенты и другие. Однако, в связи с повышением требований к очистке сточных вод, снижением энергозатрат, затрат на регенерацию, снижением стоимости сорбентов актуальной задачей является разработка, исследование и внедрение новых технологически независимых сорбционных материалов с применением отходов производства [10,11,17], а также комбинированных методов очистки [12,13].

Результаты экспериментальных исследований: изотермы адсорбции, кинетические зависимости процесса, технические характеристики разработанных сорбционных материалов являются базовыми для математического моделирования процесса адсорбции.

Целью данной работы является получение результатов экспериментальных данных по разработанным сорбционным материалам, полученных на основе шлама установок водоподготовки при очистке от анионных ПАВ.

Теоретические основы математического моделирования адсорбции

Математическое описание процесса адсорбции в стационарном слое основано на дифференциальном уравнении баланса массы [1,2]

$$\frac{\partial(a + \varepsilon C)}{\partial \tau} + w \frac{\partial C}{\partial x} = D_3 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a и C – концентрация компонента в адсорбенте и сплошной фазе; ε – порозность слоя; w – средняя скорость сплошной среды; D_3 – коэффициент эффективной диффузии, находится экспериментально; x – продольная координата; τ – время.

Выражение для кинетики адсорбции

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta_0 [a^*(C) - a], \quad (2)$$

где β_0 – коэффициент массопередачи, зависит от сопротивлений переноса вещества внутри адсорбента и внешнего потока.

Равновесная концентрация a^* чаще представляется в виде $a^* = f(C, T)$, где T – температура. При $T = const$ зависимость $a^* = \varphi(C)$ – изотерма адсорбции, которая определяется экспериментально.

Уравнения массопередачи и определение материального баланса являются основой для проведения инженерных расчетов характеристик процесса адсорбции в адсорбере постоянного действия

$$Ve(C_H - C_K) = \beta_0 \Delta C_{cp} F, \quad (3)$$

где Ve – расход поступающей на очистку жидкости; C_H, C_K – исходная и конечная концентрации приреси; ΔC_{cp} – средняя движущая сила массопередачи (средняя разность концентраций); F – площадь, учитывающая суммарную поверхность частиц в объеме слоя материала.

Средняя движущая сила массопередачи

$$\Delta C_{cp} = \frac{\Delta C_H - \Delta C_K}{\ln \frac{C_H - C_H^*(a)}{C_K - C_K^*(a)}}, \quad (4)$$

где $C_H - C_H^*(a), C_K - C_K^*(a)$ – движущие силы на входе и выходе сорбционного материала.

Значение β_0 находится по выражению аддитивности сопротивлений массообмену.

Определяемой величиной в уравнении (3) является поверхность адсорбента F .

При численном решении задач моделирования физической адсорбции применяется система дифференциальных уравнений в частных производных, т.е. уравнения баланса адсорбционного вещества между твердой и жидкой фазами в форме (1), кинетикой процесса переноса в форме (2) и изотермой адсорбции.

Процесс одномерного переноса компонента внутри твердой фазы описывается уравнением массопроводности

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где K – коэффициент массопроводности, м²/с.

Решение одномерного уравнения (5) имеет вид [1]

$$\frac{a - a^*(C)}{a_H - a^*(C)} = f(B_i, Fo, x / \delta), \quad (6)$$

где $(a - a^*(C) / a_H - a^*(C))$ – безразмерная концентрация распределяемого компонента в твердом теле; B_i – критерий Био; Fo – диффузионный критерий Фурье; x / δ – безразмерная координата, м; δ – характерный размер твердого тела, м.

Численное решение системы уравнений (1) и (2) с условиями равновесия на примере поглощения нефтепродуктов из сточных вод дано в работе [18], где получены поля концентрации в слое сорбента.

Как следует из представленных выше уравнений для расчета процесса адсорбции основной экспериментальной информацией о сорбционных материалах являются равновесные характеристики в виде изотермы адсорбции.

Экспериментальная часть

В экспериментальных исследованиях использовался карбонатный шлам Казанской ТЭЦ-1 следующего химического состава (% масс.): Ca²⁺ – 87, Mg²⁺ – 9.7, CO₃²⁻ – 71.7, OH⁻ – 10.03, SO₄²⁻ – 5.7. Отход водоподготовки содержит гуминовые вещества – до 11%

общей массы образца, что установлено методом газовой хромато-масс-спектрометрии [19]. Определены физико-химические характеристики шлама: насыпная плотность – 560 кг/м³, зольность сухого шлама – 89%, влагоемкость – 57% (масс.), pH среды – 8.53. Погрешность экспериментальных исследований не превышает 1,5%.

Шламная пульпа была обезвожена 3% влажностью в цехе термической осушки Казанской Тэц-1 и переведена в порошкообразное состояние.

Синтетические ПАВ представляют собой группу веществ, которые снижают поверхностное натяжение воды. Лаурилсульфат натрия (ЛСН) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ является одним из наиболее часто встречающихся представителей анионных синтетических ПАВ в сточных водах промышленных предприятий.

Для определения поверхностного натяжения раствора ЛСН в зависимости от различной концентрации использовали сталагмометрический метод. Для этого получали образцы модельных растворов путем разведения стандартного образца додецилсульфата натрия до требуемых концентраций.

Исследование проводили при температуре 293 К в статических условиях - определяли сорбционную емкость гранул шлама, обработанного связующими (парафином, воском) по отношению к ЛСН. Концентрацию ЛСН после адсорбционной очистки устанавливали методом экстрагирования и фотометрически с метиленовым синим [10] на фотоколориметре КФК-3. Исходная концентрация полученных растворов, используемых в эксперименте, составляла 45 мг/дм³. Предел допустимой абсолютной погрешности прибора в процессе измерений не превышает $\pm 0,5\%$.

Проведен эксперимент на определение плавучести, значение которой определяли через время t равное 0.5; 1; 3; 4 суток. Для этого навески с сорбционными материалами помещали в лабораторные стаканы объемом 50 см³, заполненные на 2/3 водой, и по окончании периода высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу в течение 2 часов. Далее сорбционные материалы взвешивали и проводили оценку количества утонувшего материала.

Результаты и их обсуждение

Для расчета поверхностного натяжения σ на границе раздела раствор ЛСН-воздух использовали известное выражение:

$$\sigma = \sigma_w \frac{\rho}{\rho_w} \frac{l_w}{l}. \quad (7)$$

где ρ – плотность, кг/м³; w – растворитель (вода); l – число капель, покинувших сталагмометр, шт.

Полученная зависимость изменения поверхностного натяжения раствора ЛСН от концентрации представлена на рис. 1.

Из рис. 1. видно, что так как $\sigma < \sigma_w$ (73.2 мН/м), то поверхностное натяжение раствора с повышением концентрации ЛСН уменьшается до 36-40 мН/м, т.е. следует, что $d\sigma/dC < 0$.

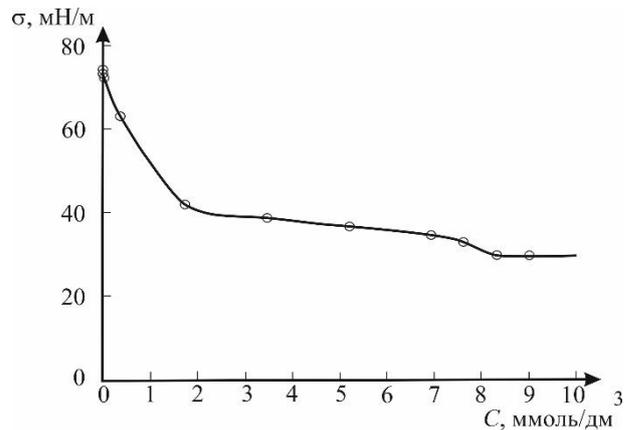


Рис. 1 - Зависимость поверхностного натяжения раствора ЛСН от концентрации ЛСН

Fig. 1 - Dependence of the surface tension of a solution of LDL on the concentration of LDL

Зависимость изменения поверхностного натяжения от концентрации вещества включает в себя три характерных области. В первой области при низких концентрациях ЛСН (от 0.1 мг/дм³ до 45 мг/дм³) практически все молекулы расположены в поверхностном слое. Наблюдается линейная зависимость $\sigma = f(C)$ в виде $\sigma = \sigma_w - constC$.

Во второй области при возрастающих концентрациях (от 45 мг/дм³ до 2.05 г/дм³) степень заполнения поверхности молекулами ПАВ увеличивается.

Третья область характерна при высоких концентрациях ЛСН (>2.3 г/дм³). На графике наблюдается характерный перегиб (при $C = 2.1$ г/дм³), который является критической концентрацией мицеллообразования (ККМ). В этой области самопроизвольно образуются мицеллы – агрегаты из ориентированных молекул, которые практически не снижают поверхностного натяжения раствора. Поверхностное натяжение определяется, главным образом, индивидуальными молекулами ЛСН, а не его концентрацией. Мицеллы включают в себя неполярную алкильную цепь и полярную группу, взаимодействующую с водой. По этой причине происходит снижение поверхностного натяжения и устанавливается постоянное значение, характерное для мицеллообразования.

Снижение значения поверхностного натяжения раствора обусловлено наличием гидрофобных углеводородных радикалов. Взаимодействие молекул воды между собой является более интенсивным, чем взаимодействие молекул ЛНС и воды.

На основе зависимости изменения поверхностного натяжения от концентрации рассчитывается адсорбция по Гиббсу, т.е. избыток моль ЛНС в поверхностном слое по сравнению с количеством этого вещества в таком же объеме фазы раствора, приходящийся на единицу площади поверхностного слоя.

Адсорбция по Гиббсу (моль/м²) в соответствии с термодинамической теорией при постоянной температуре определяется по формуле

$$G = - \frac{C}{RT} \frac{d\sigma}{dC}. \quad (8)$$

Значение адсорбции G рассчитывается на границе раздела фаз раствор ЛСН–воздух по изотерме поверхностного натяжения через величину производной $d\sigma/dC$, которая находится графическим методом при различных концентрациях ПАВ в растворе.

На основании расчетов установленные следующие характеристики водного раствора ЛСН: предельная величина адсорбции – 3.3×10^{-6} моль/м²; ККМ – 8.3 ммоль/дм³.

В работе исследовали концентрации, относящиеся к I области, для которой характерна линейная зависимость снижения поверхностного натяжения (рис.1). Таким образом, подбор связующего для карбонатного шлама осуществляли исходя из его свойств: придания плавучести, гидрофобности, нерастворимости и хорошей сорбционной способности [20]. Исходя из вышеперечисленных требований в качестве связующих выбраны воск и парафин.

Для определения сорбционной емкости гранул шлама водоподготовки по отношению к анионным ПАВ использовали выражение [21]:

$$A = \frac{(C_m - C_p)}{m} V. \quad (9)$$

где A – сорбционная емкость, мг/г; V – объем пробы модельного раствора, дм³; индекс: m – модельная; p – равновесная.

Результаты исследования статической сорбционной емкости на основе экспериментальных данных представлены в табл.1.

Таблица 1 - Значение статической сорбционной емкости A в зависимости от количества введенного связующего s

Table 1 - The value of the static sorption capacity A as a function of the amount of binder s introduced

s , % масс.	A , мг/г
15	10,8
20	14,2
25	20,5
30	22,0
35	18,6
40	16,1
50	8,6

Проведен эксперимент для определения изотерм сорбции на разработанных материалах с использованием метода переменных навесок для определения сорбционной емкости.

Как видно из рис. 2. полученные изотермы относятся к I типу по классификации БЭТ, которые свидетельствуют о мономолекулярной адсорбции. Также данный тип изотерм характерен для микропористых материалов. Сорбционная емкость материала с парафином (SM–1) составляет 22.1 мг/г, а сорбционная емкость с применением воска (SM–2) 14.6 мг/г.

Так как полученные изотермы сорбции относятся к I типу по БЭТ, то далее экспериментальные значения промоделированы с использованием классических уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха [22].

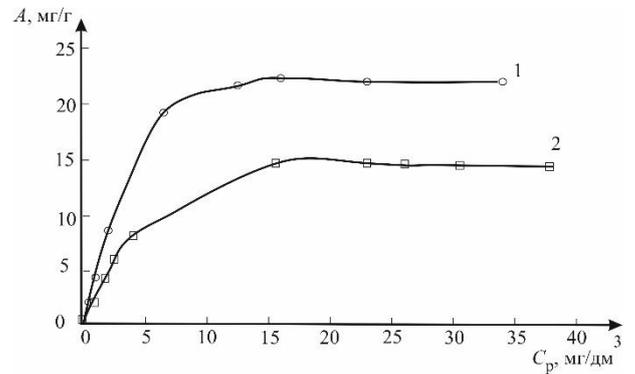


Рис. 2 - Изотерма сорбции при невысоких концентрациях ЛСН с применением гранул со связующими: 1 – парафин (SM–1); 2 – воск (SM–2)

Fig. 2 - Isotherm of sorption at low concentrations of LDL using granules with the following components: 1 – paraffin (SM–1); 2 – wax (SM–2)

Математическое описание процесса сорбции.

Уравнение Ленгмюра. Уравнение (10) показывает зависимость изменения значения адсорбции по Ленгмюру от равновесной концентрации в растворе:

$$A = A_{\infty} \frac{K_L C_p}{1 + K_L C_p}. \quad (10)$$

где K_L – константа адсорбционного равновесия, дм³/ммоль; A_{∞} – предельная адсорбция по Ленгмюру, ммоль/г.

Для определения K_L и A_{∞} в уравнении Ленгмюра, уравнение приводят к линейному виду:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\infty}} + \frac{1}{A_{\infty} K_L} \frac{1}{C_p}. \quad (11)$$

По графику, изображенному на рис. 3, в значениях молярных концентраций, в координатах

$\frac{1}{A} = f\left(\frac{1}{C_p}\right)$, определяют и константы адсорбционного равновесия $K_L = \frac{1}{A_{\infty} \text{tga}}$.

По результатам расчета получены константы адсорбционного равновесия, а также линейные уравнения и значения их достоверности (табл. 2).

По результатам расчета получены константы адсорбционного равновесия, а также линейные уравнения и значения их достоверности (табл. 2).

Таблица 2 - Константы адсорбционного равновесия по модели Ленгмюра

Table 2 - Adsorption equilibrium constants according to the Langmuir model

Параметр	SM–1	SM–2
A_{∞} , ммоль/г	0.1219	0.0661
K_L , дм ³ /ммоль	14.7996	17.4052
R^2	0,995	0,996

Микропоры, расположенные на поверхности сорбционных материалов, по своему размеру являются соизмеримыми с размерами молекул ЛНС. Поэтому независимо от природы адсорбционных сил, которые обуславливают процесс физической адсорбции

ции (электростатическое взаимодействие, дисперсионные силы и т.д.), по всему объему микропор находится адсорбционное поле, образуемое твердым материалом. Таким образом, основной характеристикой является объем пор материала, так как именно объем микропоры ограничивает пространство взаимодействия материала и молекул адсорбата.

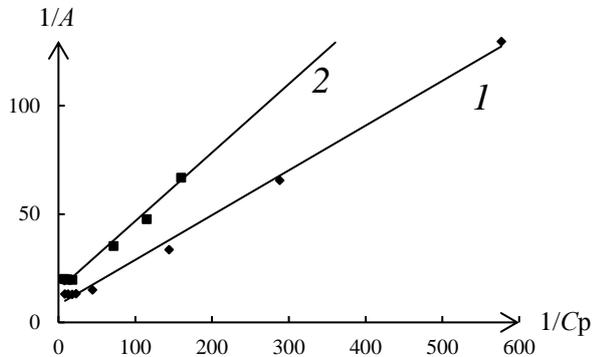


Рис. 3 - Изотерма адсорбции ЛСН на сорбционных материалах в координатах линейного уравнения Ленгмюра: 1 – парафин (SM-1); 2 – воск (SM-2). Точки – эксперимент; линия – расчет

Fig. 3 - Isotherm of LSN adsorption on sorption materials in the coordinates of the linear Langmuir equation: 1 – paraffin (SM-1); 2 – wax (SM-2). The dots are an experiment; the line is a calculation

Теория объемного заполнения пор, разработанная М.М. Дубининым, удовлетворительно описывает процесс адсорбции на разработанных материалах.

Экспериментальные результаты процесса адсорбции обработаны с применением уравнения Дубинина–Радушкевича с константой адсорбционного равновесия, K_E (дм³/моль), относящейся к энергии адсорбции

$$A = A_{\infty} e^{(-K_E \epsilon^2)}, \quad (12)$$

где ϵ – потенциал Поляни (кДж/моль), показывающий изотермическую работу переноса одного моля ЛНС из объема равновесного раствора к поверхности гранул, который рассчитывается по выражению:

$$\epsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_p} \right). \quad (13)$$

Изотерма Дубинина–Радушкевича является более общей, чем изотерма Ленгмюра, так как она не предполагает гомогенности поверхности или постоянства адсорбционного потенциала. Она используется для определения природы процесса: физическая или химическая адсорбция.

Преобразуя уравнение Дубинина–Радушкевича в линейный вид, следует:

$$\ln A = \ln A_{\infty} - K_E \epsilon^2. \quad (14)$$

Уравнение Дубинина–Радушкевича показывает природу процесса адсорбции и применимо для определения свободной энергии адсорбции

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_E}}. \quad (15)$$

Рассчитанные значения свободной энергии адсорбции E для сорбционных гранул с парафином и воском составляют соответственно 6,65 кДж/моль и 6,9 кДж/моль, что свидетельствует о протекании физической природе взаимодействия молекул ЛНС и сорбционных материалов.

Полученные экспериментальные данные могут использоваться при решении системы дифференциальных уравнений в частных производных (1), (2), описывающих кинетику переноса примесей из потока жидкой фазы внутрь зерен адсорбента [1,2,18]. В качестве аппаратного оформления процесса сорбции применяются известные адсорберы [2,23]. Пример численного решения системы дифференциальных уравнений при адсорбционной очистке сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов показан в работе [18].

Заключение

Таким образом, на основании выполненных исследований по определению изотерм сорбции установлено, что материал на основе шлама водоподготовки тепловых электрических станций совместно со связующими: парафином и воском может быть использован для очистки сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ с концентрациями загрязнений до 45 мг/дм³ как сорбционный материал. Достоинством применения данных связующих является придание шламу таких свойств как гидрофобность, а также плавучесть.

Экспериментальные данные по адсорбции лаурил сульфата натрия обобщены с использованием классического уравнения Ленгмюра. Определены константы адсорбционного равновесия и значения их достоверности. Модель Ленгмюра с высокой долей достоверности описывает процесс адсорбции на полученных сорбционных материалах. Рассчитанные значения свободной энергии адсорбции свидетельствуют о протекании физической природе взаимодействия молекул ЛНС и сорбционных материалов.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>»

"The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>"

Литература

1. Романков, П. Г., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой) *Ленинград : Химия, Ленингр. отд-ние, 1990.*
2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. *Химия, 2011.*
3. Абзальдинов Х.С., Кадирова Ш.А., Махкамов М.А., Гафурова Д.А., Тунакова Ю.А., Ярошевская Х.М., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. Вестник технологического университета. 2024. Т.27, №11. с 29-45.
4. Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Бараева Л.Р., Сулейманова А.З., Хацринов А.И. Вестник технологического университета. 2024. Т.27, №4. с.47-51.

5. Плахина Д.С., Богданович Н.И., Канарская З.А., Канарский А.В. Вестник технологического университета. 2024. Т.27, №12. с. 92-102.
6. Ланге К.Р. СПб.: Профессия, 2004.
7. Кадыров А.А., Кадыров Н.А. Ташкент: ТашГТУ, 2015.
8. Русанов А.И., Щёкин А.К. СПб.: Лань, 2016.
9. Kim S.-H., Yun Y., An S. J. Soc. Cosmetic Sci. Korea. 2018. V.44. № 1. P. 1.
10. Lee W., Yoon S., Choe J.K., Lee M., Choiet Y. Sci. Total Environ. 2018. V. 639. P. 1432.
11. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Colloid J. 2024. V. 86. № 1. P. 33.
12. Heidarinejad Z., Dehghani M.H., Heidari M., Javedan G., Ali I., Sillanpää M. Environ. Chem. Lett. 2020. V. 18. № 2. P. 393.
13. Ivanets M.G., Savitskaya T.A., Nevar T.N., Grinshpan D.D. Russ. J. Phys. Chem. 2012. V. 86. № 11. P. 1835.
14. Palmer M., Hatley H. Water Res. 2018. V. 147. № 12. P. 60.
15. Dudarev V.I., Irinchinova N.V., Filatova E.G. Chem-ChemTech. 2017. V.60. № 1. P. 75.
16. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2015.
17. Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2016.
18. Dremicheva E., Laptev A. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. 53(3). P.355.
19. Nikolaeva L.A. Thermal Eng. 2022. № 1. P. 72.
20. Полевой Л.А., Санджиева Д.А., Баранчиков А.Е., Гайзуллин А.Д., Убушаева Б.В., Иванов В.К., Бузник В.М., Дедов А.Г. Теоретические основы химической технологии. 2024. № 1. Т. 58. С. 103.
21. Спиридонов Е.А., Самонин В.В., Подвязников М.Л., Хрылова Е.Д., Хохлачев С.П. Теоретические основы химической технологии 2024. № 2. Т. 58. С.183.
22. Tagavifar M., Jang S.H., Sharma H., Wang D., Chang L.Y., Mohanty K., Pope G.A. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2018. V. 538. № 2. P. 549.
23. Лаптев А.Г., Конахин А.М., Минеев Н.Г. М.: Теплотехник, 2011
3. Abzalidinov, H.S., Kadirova, Sh.A., Makhkamov, M.A., Gafurova, D.A., Tunikova, Yu.A., Yaroshevskaya, H.M., Kazakov, Yu.M., Stoyanov, O.V. Herald of Technological University. 2024. Vol. 27, No. 11. pp. 29-45.
4. Dubrovin K.R., Shakirov T.R., Baraeva L.R., Suleimanova A.Z., Khatzrinov A.I. Herald of Technological University. 2024. Vol. 27, No. 4. pp. 47-51.
5. Plakhina D.S., Bogdanovich N.I., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V. Herald of Technological University. 2024. Vol. 27, No. 12. pp. 92-102.
6. Lange K.R. St. Petersburg: Profession, 2004.
7. Kadyrov A.A., Kadyrov N.A. Tashkent: Tashkent State Technical University, 2015.
8. Rusanov A.I., Shchekin A.K. St. Petersburg: Lan, 2016.
9. Kim S.-H., Yun Y., An S. J. Soc. Cosmetic Sci. Korea. 2018. V.44. No. 1. P. 1.
10. Lee W., Yoon S., Choe J.K., Lee M., Choiet Y. Sci. Total Environ. 2018. V. 639. P. 1432.
11. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Colloid J. 2024. V. 86. No. 1. P. 33.
12. Heidarinejad Z., Dehghani M.H., Heidari M., Javedan G., Ali I., Sillanpää M. Environ. Chem. Lett. 2020. V. 18. No. 2. P. 393.
13. Ivanets M.G., Savitskaya T.A., Nevar T.N., Grinshpan D.D. Russ. J. Phys. Chem. 2012. V. 86. No. 11. P. 1835.
14. Palmer M., Hatley H. Water Res. 2018. V. 147. No. 12. P. 60.
15. Dudarev V.I., Irinchinova N.V., Filatova E.G. Chem-ChemTech. 2017. V.60. No. 1. P. 75.
16. Gavrilova N.N., Nazarov V.V. Moscow: Mendeleev University of Chemical Technology. 2015.
17. Khoroshavin L.B., Belyakov V.A., Svalov E.A. Yekaterinburg: Ural University Press. 2016.
18. Dremicheva E., Laptev A. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. 53(3). P.355.
19. Nikolaeva L.A. Thermal Eng. 2022. No. 1. P. 72.
20. Polevoy L.A., Sanjjeva D.A., Baranchikov A.E., Gayzullin A.D., Ubushayeva B.V., Ivanov V.K., Buznik V.M., Dedov A.G. Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2024. No. 1. Vol. 58. P. 103.
21. Spiridonov E.A., Samonin V.V., Podvyaznikov M.L., Khrylova E.D., Khokhlachev S.P. Theoretical Foundations of Chemical Technology 2024. No. 2. Vol. 58. P. 183.
22. Tagavifar M., Jang S.H., Sharma H., Wang D., Chang L.Y., Mohanty K., Pope G.A. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2018. V. 538. No. 2. P. 549.
23. Laptev A.G., Konakhin A.M., Mineev N.G. Moscow: Teplootekhnik, 2011.

References

1. Romanov, P. G., Frolov, V. F. Mass transfer processes in chemical technology (systems with dispersed solid phase) Leningrad: Chemistry, Leningrad Branch, 1990.
2. Komissarov, Yu. A., Gordeev, L. S., Vent, D. P. Chemistry, 2011.

© А. Г. Лаптев – д.т.н., профессор, каф. Инженерная экология и безопасность труда (ИЭБТ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, tvtkgeu@mail.ru; Р. Я. Исхакова – доцент, к.т.н., доцент каф. ИЭБТ, КГЭУ, tvtkgeu@mail.ru.

© А. Г. Лаптев – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Engineering Ecology and Occupational Safety (EEOS), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, tvtkgeu@mail.ru; Р. Я. Исхакова – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the EEOS department, KSPEU, tvtkgeu@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 31.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 23.04.25.