
**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)
ECOLOGICAL SAFETY
(TECHNICAL AND CHEMICAL)**

УДК 628.316.13
DOI 10.48612/ntp/nth2-zuv2-emb2

**АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ОТ АНИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДА ЭНЕРГЕТИКИ**

Р. Я. ИСХАКОВА, А. И. САЛИМОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»,
Российская Федерация, Казань
Email: imreginaiskh@gmail.com, salimovajnur31@gmail.com

В статье рассмотрен процесс адсорбционной очистки сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ в динамических условиях. В качестве сорбента предлагается использование материала, разработанного на основе отхода энергетики – карбонатном шламе, образующемся в процессе химической подготовки добавочной природной воды, обработанном связующим (парафином) и окатанном в гранулы. Проведены экспериментальные исследования по очистке водных сред на разработанных гранулах, определена динамическая и полная сорбционная емкость материала, по уравнению Н.А.Шилова рассчитан коэффициент защитного действия слоя, что позволяет масштабировать результаты лабораторных испытаний на промышленные адсорберы.

Особое внимание уделено оценке лимитирующей стадии процесса адсорбции. Установлено, что процесс адсорбции от анионных синтетических поверхностно-активных веществ на разработанном материале лимитируется внутренней диффузией. По результатам экспериментальных и теоретических исследований предложена технология доочистки сточных вод и аппаратное оформление процесса адсорбции, позволяющее производить очистку сточных вод до нормативов допустимого сброса перед их спуском в водоем.

Предложенный подход, решающий двойную экологическую задачу: переработку и вторичное использование отходов, образующихся на предприятиях энергетики, и очистку сточных вод от анионных поверхностно-активных веществ, позволяет реализовать принципы ресурсосбережения, внедрить экозащитные технологии, направленные на сохранение окружающей природной среды и обеспечить экологическую безопасность населения.

Ключевые слова: отходы производства, очистка сточных вод, сорбционные материалы, поверхностно-активные вещества, лимитирующая стадия, адсорбция, экологически безопасная технология.

**ADSORPTION TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER FROM ANIONIC
SURFACTANTS UNDER DYNAMIC CONDITIONS USING ENERGY WASTE**

R. Ya. ISKHAKOVA, A. I. SALIMOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan State Power Engineering University»,
Russian Federation, Kazan
Email: imreginaiskh@gmail.com, salimovajnur31@gmail.com

This article considers the process of adsorption wastewater treatment from anionic synthetic surfactants under dynamic conditions. The proposed sorbent is a material developed using energy waste—carbonate sludge formed during the chemical treatment of natural water, treated with a binder (paraffin), and pelletized. Experimental studies of aqueous media purification using the developed granules were conducted, the dynamic and total sorption capacity of the material was determined, and allowing the scaling of laboratory test results to industrial adsorbers the protective action coefficient of the layer was calculated using N.A. Shilov's equation.

Particular attention is paid to assessing the rate-limiting stage of the adsorption process. It was found that the adsorption process from anionic synthetic surfactants on the developed material is limited by internal diffusion. Based on the results of experimental and theoretical studies, a wastewater post-treatment technology and adsorption process instrumentation have been proposed, enabling wastewater treatment to meet permissible discharge standards before discharge into a water body.

The proposed approach, which addresses the dual environmental challenges of recycling and reusing waste generated at energy facilities and removing anionic surfactants from wastewater, enables resource conservation principles to be implemented, eco-friendly technologies to be implemented, and environmental protection technologies to preserve the natural environment and ensure public safety.

Keywords: industrial waste, wastewater treatment, sorption materials, surfactants, rate-limiting stage, adsorption, environmentally friendly technology.

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают проблемы экологической безопасности и сохранения окружающей природной среды. Интенсивное развитие промышленности сопровождается большим количеством образующихся сточных вод, и, как следствие, возрастающим антропогенным воздействием на поверхностные водоемы. Негативное влияние на состояние гидросферы оказывают анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ), которые широко применяются в составе моющих средств, эмульгаторов, флотационных реагентов и смазочно-охлаждающих жидкостей и пр.

Поступая со сточными водами, АПАВ оказывают комплексное негативное воздействие: нарушают кислородный обмен, способствуют мобилизации труднорастворимых загрязнителей (нефтепродуктов, пестицидов и пр.) вследствие солюбилизирующего действия. Многие синтетические АПАВ обладают биологической резистентностью и способны накапливаться в экосистемах, проявляя токсический эффект [1].

Традиционные методы удаления АПАВ из сточных вод – коагуляция, пенная флотация и прочие не всегда обеспечивают требуемую степень очистки до нормативных значений, особенно при необходимости отведения вод в водоем, характеризуются высокими эксплуатационными затратами [2]. В связи с этим адсорбция является одним из наиболее целесообразных методов глубокой доочистки, позволяющих извлекать АПАВ.

Ключевой проблемой широкомасштабного применения адсорбционной очистки является высокая стоимость традиционных

сорбентов – активных углей, синтетических ионообменных смол и углеродных материалов, производство которых связано с высокими энергетическими и материальными затратами (термохимическая активация и пр.). По этой причине в настоящее время особый интерес вызывают сорбционные материалы, полученные на основе отходов производства и потребления.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время вопросами очистки сточных вод от АПАВ активно занимаются как отечественные, так и зарубежные научные школы. Наиболее часто для этих целей применяются различные физико-химические методы очистки. Например, в работе [3] предлагается использовать комбинированный процесс химической коагуляции-флокуляции/ультрафиолетового фотолиза для разделения и окислительного разложения линейного алкилбензолсульфоната (АПАВ) в сточных водах прачечных с целью их извлечения до нормативных значений. В качестве коагулянта-сорбента, комплексообразователя и катионного высокомолекулярного флокулянта выбраны минеральная зола, $ZnCl_2$ и Праестол-650 соответственно. Результаты показали, что максимальная эффективность удаления АПАВ составила 75 %. Для извлечения АПАВ также используется способ электрохимической очистки с предварительной обработкой промышленных сточных вод косметической промышленности флокулянтами с известью и сульфатом алюминия (квасцы) [4]. Применение флотации для очистки сточных вод от ПАВ с применением колонных флотационных аппаратов позволяет удалять загрязнения [5].

Одним из перспективных методов очистки сточных вод, используемых для удаления различных АПАВ, является адсорбция, который обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с другими методами [6]. Метод сорбционной очистки сточных вод от АПАВ основан на способности сорбционных материалов фиксировать загрязняющие компоненты из жидких сред [7]. Данный процесс по своей природе может относиться к физической адсорбции или хемосорбции молекул ПАВ на поверхности сорбента.

В работе [8] в качестве сорбционного материала АПАВ был использован дефекат, образующийся при производстве сахара на стадии очистки свекловичного сока. В состав дефеката входит до 75 % CaCO_3 , около 20 % органических примесей, а также инертные вещества. Установлено, что оптимальная масса добавки для извлечения АПАВ из раствора с исходной концентрацией 25 мг/дм³ составляет 4 г на 1 дм³ раствора; длительность перемешивания 15 мин при температуре 20 °C [9].

Проведено исследование [10] переработки косточек маслин и скорлупы грецких орехов в углеродные сорбенты. На основании результатов термогравиметрических исследова-

ний и элементного состава сырья выбрана оптимальная технология переработки и технологические параметры процесса карбонизации.

Таким образом, сорбционная очистка сточных вод от АПАВ на очистных сооружениях, особенно с использованием отходов производства, является перспективным решением.

Цель статьи

Разработка, научное обоснование, исследование кинетики с выявлением лимитирующей стадии адсорбционной очистки воды от АПАВ сорбционным материалом на основе шлама водоподготовительных установок тепловых электрических станций.

Материалы и методы исследования

В научном исследовании использовали методы физического моделирования. Экспериментальные исследования проводили с использованием отхода энергетики – шлама водоподготовительных установок тепловых электрических станций (ВПУ ТЭС) и связующего – парафина. Шлам ВПУ ТЭС представляет собой отход следующего химического состава (табл. 1.).

Таблица 1. Химический состав шлама ВПУ

Минеральная часть							
Катионы	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺
%, масс.	66,12±0,32	17,15±0,18	0,72±0,02	0,81±0,13	0,07±0,001	0,043±0,003	0,064±0,001
Анионы	CO ₃ ²⁻		SiO ₃ ²⁻		OH ⁻		SO ₄ ²⁻
%, масс.	56,64±0,11		18,42±0,093		8,37±0,06		1,56±0,01
Органическая часть, 15 %							

Шлам ВПУ – отход энергетики V класса опасности. Гранулометрический состав представлен в основном фракцией 0,09–0,5 мм (более 61 %). Шлам ВПУ ТЭС представляет собой суспензию бурого цвета влажностью $W=60\%$.

В экспериментальных исследованиях проводили предварительную сушку шлама до $W=3\%$. Далее шлам ВПУ ТЭС совместно со связующим направляли на гранулирование путем окатывания гранул диаметром 3-6 мм. Связующим компонентом выступал технический парафин в количестве 30 % масс. Для протекания адсорбции в динамических условиях гранулы заданного диаметра обеспечивают снижение перепада давления в аппарате, парафин способствует повышению гидрофобности поверхности шлама ВПУ и формированию на его поверхности мезопор.

Проведены лабораторные экспериментальные исследования в динамическом режиме в адсорбционной колонке диаметром 3 см и высотой 50 см. Колонку равномерно заполняли

сорбционным материалом на различные высоты загрузки (10; 15; 20; 25 см) до прекращения усадки. Через слой сорбционного материала непрерывно сверху вниз пропускали модельный раствор лаурил сульфата натрия (АПАВ) с концентрацией $C_0=3$ мг/дм³ со скоростью 0,16 м/мин, устанавливая перистальтическим насосом расход 110 см³/мин, до появления «проскока» в элюате и последовавшего далее выравнивания концентраций. Элюат собирали отдельными порциями, в каждой определяли содержание АПАВ экстракционно-фотометрическим методом с метиленовым синим.

Для обработки результатов измерений и вычисления погрешностей оценки измеряемой величины использован ГОСТ Р 8.736-2011.

Результаты исследования и их обсуждение

Адсорбционная очистка водных сред в динамических условиях. При адсорбционной доочистке сточных вод для сброса очищенных

вод в водоем в качестве нормативного значения использовали значение ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения – 0,1 мг/дм³. На рис. 1 представлен график зависимости изменения концентрации от объема пропущенного раствора. Динамическая сорбционная емкость

(ДСЕ) сорбционных гранул определялась по «проскоку» АПАВ на выходе раствора из колонки. Время, прошедшее с начала анализа до «проскока» поглощаемого иона, составило 21 ч 35 мин (21,6 ч).

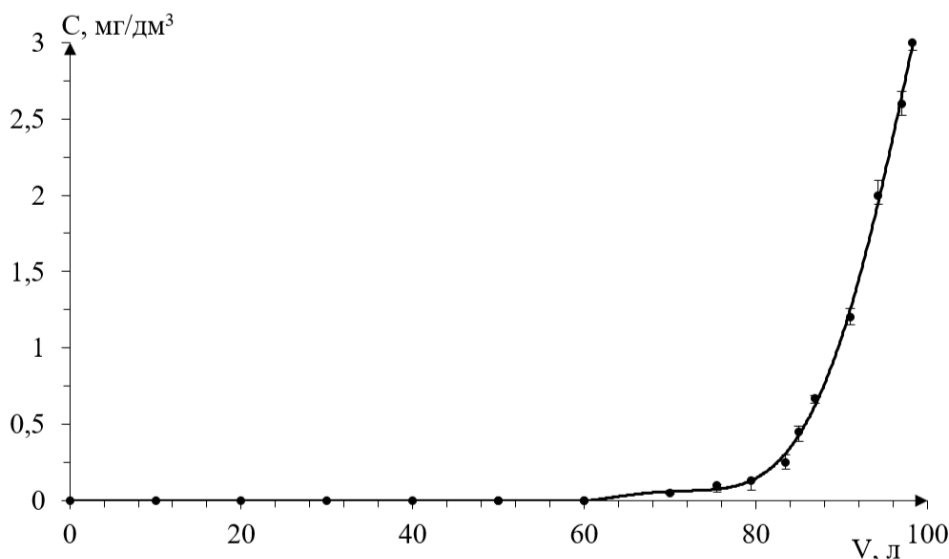


Рис. 1. График изменения концентрации АПАВ от пропущенного объема раствора

ДСЕ сорбционного материала определяется по формуле и составляет:

$$\text{ДСЕ} = \frac{C_0 \cdot V_{\text{пр}}}{m} = 5,91 \text{ мг/г} \quad (1)$$

До полного насыщения через колонку пропущено $V_{\text{полн}} = 222,3 \text{ дм}^3$. Полная динамическая сорбционная емкость (ПДСЕ) сорбционного материала определяется по формуле (2) и составляет:

$$\text{ПДСЕ} = \frac{C \cdot V_{\text{полн}}}{m} = 7,68 \text{ мг/г} \quad (2)$$

Проведен сравнительный анализ полученного значения ДСЕ со значениями ДСЕ различных отходов производства при адсорбции активированным углем в динамическом режиме (табл. 2) [11].

Полученное значение ДСЕ = 5,91 мг/г сравнимо с прочими отходами производства, которые используются в качестве сорбционных материалов.

Процесс динамической адсорбции в аппарате с неподвижным слоем характеризуется последовательным насыщением адсорбента по направлению движения жидкости. В слое формируется зона массопереноса (адсорбционный фронт), в которой наблюдается изменение концентрации адсорбируемого компонента от $C_0 = 3 \text{ мг/дм}^3$ до нулевого значения на выходе. По мере пропускания сточных вод происходит постепенное насыщение верхних слоев сорбционного материала до равновесной концентрации и смещение фронта адсорбции в последующий слой [12].

Таблица 2. Значения ДСЕ различных материалов [11]

Отход	ДСЕ, мг/г
Древесные опилки	0,79
Кокс коксохимического завода (Макеевка, ДНР)	1,49
Зольные алюмосиликатные микросферы (Старобешевская ТЭС)	3,60
Котельный шлак (Донецк)	11,33
Уголь активированный АГН	86,72

Для определения времени защитного действия слоя τ как основной расчетной характеристики адсорбера использовали уравнение Н. А. Шилова для инженерных расчетов:

$$\tau = KN - \tau_0, \quad (3)$$

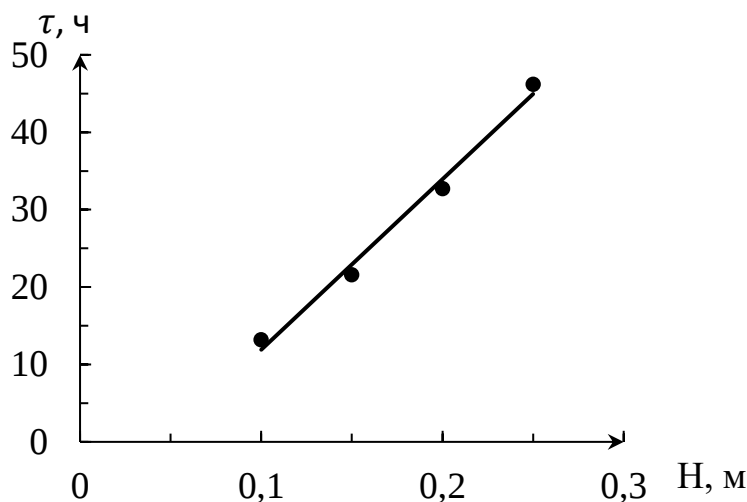


Рис. 2. Зависимость изменения защитного действия слоя адсорбента от высоты загрузки

По рис. 2 определяется коэффициент защитного действия как $K = tg \alpha$ и τ_0 . Значение коэффициента защитного действия составила 220,2 ч/м; потеря времени защитного действия – 10,11 ч.

Оценка лимитирующей стадии процесса адсорбции. Сорбционная очистка является многостадийным процессом, для оценки лимитирующей стадии процесса используются диффузионные модели, позволяющие оценить вклад внешней и внутренней диффузии.

Для оценки лимитирующей стадии использована диффузионная модель Бойда [13]. При преобладании внутридиффузионного лимитирования в соответствии с моделью для определения коэффициентов диффузии внутри зерна сорбента используется уравнение Бойда-Адамсона:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^m \frac{1}{n^2} e^{-Dn^2\pi^2 t/r_0^2}, \quad (4)$$

где F – доля равновесной сорбции, достигнутая к моменту времени t , определяемая по формуле $F = A_t/A$, где A_t , A – сорбционная емкость в момент времени t и в состоянии равновесия, ммоль/г; n – количество извлекаемых веществ; B – кинетический коэффициент, c^{-1} , который

где K – коэффициент защитного действия; H – высота загрузки ШМП, м; τ_0 – потеря времени защитного действия, ч.

На рис.2 представлен график зависимости защитного действия слоя адсорбента τ от высоты загрузки сорбционного материала.

определяется по уравнению $B = D\pi^2/r_0^2$, где D – коэффициент внутренней диффузии, cm^2/s ; r_0^2 – радиус зерна сорбционного материала, см; Bt – безразмерный параметр, предложенный Бойдом, который представляет решение задачи диффузии в твердом теле определенной формы. После подстановки B и преобразований получена формула:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^m \frac{1}{n^2} e^{-n^2 Bt}. \quad (5)$$

По экспериментально найденным значениям доли равновесной сорбции F определяются значения безразмерного параметра Bt . На рис. 3 представлена зависимость $Bt = f(t)$.

Линейность зависимости Bt от t (рис. 3) с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9792$) является признаком внутридиффузионного лимитирования.

Расчет коэффициентов внутренней диффузии проводится на основе экспериментальных кинетических зависимостей по формуле:

$$D = \frac{Br_0^2}{\pi^2}. \quad (6)$$

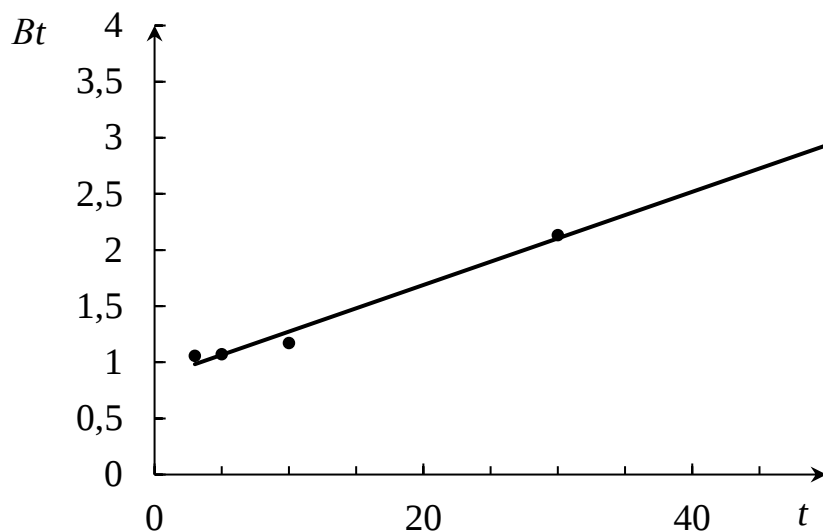


Рис. 3. Зависимость $Bt = f(t)$ при сорбции

Эффективные коэффициенты диффузии учитывают как диффузионные ограничения переноса молекул в системе сорбент-сорбат, так и влияние сопутствующих процессов (набухание сорбента и пр.) и определяются с учетом порозности. Коэффициент массопроводности находили по диффузионному критерию Фурье (безразмерное время) [14]:

$$F_0 = \frac{Kt}{r_0^2}, \quad (7)$$

с учетом формулы (8)

$$I = -K \frac{dC}{dx}; \frac{dC}{dx} = K \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (8)$$

где I – поток диффундирующего в направлении x вещества; t – длительность контакта образца с диффундирующим веществом; C – концентрация диффундирующего вещества в единице объема или массы образца. С учетом (7) и (8) определяется коэффициент массопроводности.

Рассчитанные коэффициенты эффективной диффузии и массопроводности в разный момент времени адсорбции представлены в табл. 3.

Для уточнения механизма проведена оценка механизма диффузии по диффузионному критерию Био [14], который представляет собой отношение внутреннего сопротивления массопереносу (в структуре гранулы) к внешнему (из потока к поверхности гранулы):

$$Bi = \frac{\beta \cdot r_0^2}{K}, \quad (9)$$

где K – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коэффициент массоотдачи, с^{-1} .

По расчетному значению диффузионного критерия Био определяется лимитирующая стадия процесса [15]. При $Bi \geq 30$ общая скорость массопередачи определяется внутренней диффузией (внутридиффузионный процесс). В случае, если $Bi \leq 0,1$ процесс является внешедиффузионным. Расчетные значения критерия Био $Bi \geq 588$, следовательно, процесс является внутридиффузионным.

Технологическая схема адсорбционной доочистки сточных вод. Для полной доочистки сточных вод от АСПАВ разработан узел адсорбционной доочистки (рис. 4), включающий адсорбционные колонны.

Таблица 3. Значения коэффициентов эффективной диффузии и массопроводности в разный момент времени адсорбции

$t, \text{с}$	180	300	600	1800
$D_{\text{э}}, \text{м}^2/\text{с}$	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$4,34 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$
$K, \text{м}^2/\text{с}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$5,19 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{-12}$

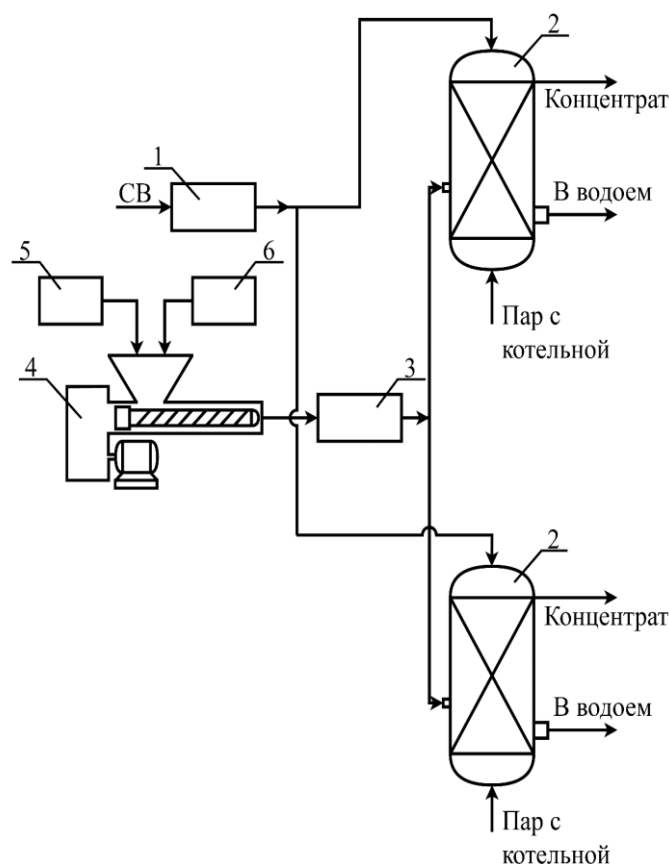


Рис. 4. Адсорбционный узел доочистки сточных вод от АПАВ

1 – приемная емкость сточных вод;
2 – адсорбер; 3 – бункер хранения сорбционного материала; 4 – экструдер;
5 – ленточная сушилка;
6 – бункер подготовки связующего

Сточные воды поступают в емкость 1, из которой насосами подаются в адсорбер 2, загруженный сорбционным материалом. Для формирования гранул используется шлам ВПУ, поступающий из шламонакопителя на ленточную сушилку 5 и парафин из бункера 6, которые подаются на экструдер 4. После формирования гранулы поступают в бункер хранения 3, а затем загружаются в адсорбер 2 с неподвижной загрузкой непрерывного действия, где реализуется адсорбционная очистка сточных вод. Далее очищенные воды могут отводиться на сброс в водоем.

Для обеспечения бесперебойной работы узла адсорбционной доочистки необходимо установить 2 параллельно работающих и 1 резервный адсорбер (на время регенерации сорбционного материала в адсорберах).

При выключении адсорбера на регенерацию происходит пропаривание сорбционного материала паром, производимым котельной. Загрязненный АПАВ концентрат может быть использован на нужды предприятия или смежных отраслей промышленности.

Выводы

Для доочистки сточных вод от АПАВ при невысокой загрязненности предлагается использовать адсорбционную очистку в адсор-

бере, загруженном гранулами сорбционного материала на основе отхода энергетики. Очистка в адсорберах позволит проводить обезвреживание сточных вод от АСПАВ до нормативных значений ПДК для их дальнейшего отведения в водоем.

Исследована и экспериментально подтверждена возможность доочистки сточных вод от АПАВ (при концентрации ≤ 3 мг/дм³) при пропускании сточных вод через неподвижный слой сорбционного материала, динамическая сорбционная емкость которого составляет 5,91 мг/г; полная динамическая сорбционная емкость – 7,68 мг/г; коэффициент защитного действия – 220,2 ч/м; потеря времени защитного действия – 10,11 ч.

Проведена оценка лимитирующей стадии процесса адсорбции, которая свидетельствует о преобладании внутридиффузионного лимитирования. На основании полученных результатов разработан узел адсорбционной доочистки сточных вод, включающий адсорбционные колонны.

Разработанный научно-обоснованный подход и технологические решения адсорбционной очистки сточных вод обеспечивает повышение экологической безопасности при использовании отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса.

Список литературы

1. Шачнева Е. Ю. Поверхностно-активные вещества в объектах окружающей среды. М.: Lambert Academic Publishing, 2013. 64 с.
2. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 2018, vol. 147, pp. 60–72.
3. Combined chemical coagulation–flocculation/ultraviolet photolysis treatment for anionic surfactants in laundry wastewater / E. L. Terechova, G. Zhang, J. Chen [et al.]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, vol. 2, issue 4, pp. 2111–2119.
4. Aloui F., Kchaou S., Sayadi S. Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, issue 1, pp. 353–359.
5. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности от поверхностно-активных веществ и жиров флотацией / Б. С. Ксенофонтов, А. С. Козодаев, Р. А. Таранов [и др.] // *Экология и промышленность России*. 2013. № 11. С. 4–7.
6. Шумяцкий Ю. И. Адсорбционные процессы. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 164 с.
7. Дударев В. И., Иринчинова Н. В., Филатова Е. Г. Адсорбция ионов никеля (II) из водных растворов углеродными адсорбентами // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 1. С. 75–81.
8. Сорбционное извлечение лаурилсульфата натрия из водных сред с помощью отхода сахарной промышленности / Ж. А. Сапронова, Р. О. Фетисов, И. Г. Шайхиев [и др.] // *Вестник Казанского государственного технологического университета*. 2014. Т. 17. № 3. С. 163–165.
9. Фетисов Р. О. Сорбционная очистка сточных вод от СПАВ отходом производства сахарной промышленности – сатурационным осадком: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. Уфа, 2015. 20 с.
10. Передерий М. А. Получение углеродных сорбентов из некоторых видов биомассы // *Химия твердого топлива*. 2008. № 4. С. 30–36.
11. Соловьева Е. А., Бабенко А. С. Очистка городских сточных вод, обработка и биологическая трансформация осадка: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 140 с.
12. Короткова Т. Г., Бушумов С. А. Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов прокаленным сорбентом из золошлаковых отходов энергетики // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13, № 1. С. 142–151.

13. Маслова М. В., Евстропова П. Е. Кинетика сорбции катионов кадмия и кобальта сорбентом на основе фосфата титана // *Журнал физической химии*. 2021. Т. 95, № 10. С. 1585–1590.

14. Глазков С. С. Адсорбционные процессы в условиях изотермической пропитки древесины растворами олигомеров // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т. 8, вып. 3. С. 454–464.

15. Обливин А. Н., Прокофьев Н. С., Воскресенский А. К. Процессы и аппараты производства древесных плит и пластиков. М.: Экология, 1991. 448 с.

References

1. Shachneva E. Yu. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva v ob»ektax okruzhayushchey sredy* [Surfactants in environmental objects]. Moscow: Lambert Academic Publishing, 2013. 64 p.
2. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 2018, vol. 147, pp. 60–72.
3. Combined chemical coagulation–flocculation/ultraviolet photolysis treatment for anionic surfactants in laundry wastewater / E. L. Terechova, G. Zhang, J. Chen [et al.]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, vol. 2, issue 4, pp. 2111–2119.
4. Aloui F., Kchaou S., Sayadi S. Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, issue 1, pp. 353–359.
5. Ochistka stochnykh vod predpriyatiy pishchevoy promyshlennosti ot poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i zhirov flotatsiyey [Wastewater treatment of food industry enterprises from surfactants and fats by flotation] / B. S. Ksenofontov, A. S. Kozodaev, R. A. Taranov [et al.]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2013, issue 11, pp. 4–7.
6. Shumyatskiy Yu. I. *Adsorbtsionnye protsessy* [Adsorption processes]. Moscow: RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2005. 164 p.
7. Dudarev V. I., Irinchinova N. V., Filatova E. G. Adsorbtsiya ionov nikelya (II) iz vodnykh rastvorov uglerodnymi adsorbentami [Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solutions by carbon adsorbents]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2017, vol. 60, issue 1, pp. 75–81.
8. Sorbtsionnoe izvlechenie lauril sul'fata natriya iz vodnykh sred s pomoshch'yu otkhoda sakharnoy promyshlennosti [Sorption extraction of sodium lauryl sulfate from aqueous media using sugar industry waste] / Zh. A. Sapronova,

R. O. Fetisov, I. G. Shaykhiev [et al.]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, issue 3, pp. 163–165.

9. Fetisov R. O. Sorbtionnaya ochestka stochnykh vod ot SPAV otkhodom proizvodstva sakharnoy promyshlennosti – saturatsionnym osadkom. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Sorption wastewater treatment from surfactants by waste of sugar industry – saturator precipitate. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Ufa, 2015. 20 p.

10. Perederiy M. A. Poluchenie uglerodnykh sorbentov iz nekotorykh vidov biomassy [Obtaining carbon sorbents from some types of biomass]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2008, issue 4, pp. 30–36.

11. Solov'eva E. A., Babenko A. S. *Ochestka gorodskikh stochnykh vod, obrabotka i biologicheskaya transformatsiya osadka: monografiya* [Municipal wastewater treatment, processing and biological transformation of sludge: monograph]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2019. 140 p.

12. Korotkova T. G., Bushumov S. A. Kineticheskie krivye sorbtzii nefteproduktov

prokalennym sorbentom iz zoloshlakovykh otkhodov energetiki [Kinetic curves of oil product sorption by calcined sorbent from ash and slag waste of power engineering]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2023, vol. 13, issue 1, pp. 142–151.

13. Maslova M. V., Evstropova P. E. Kinetika sorbtzii kationov kadmiya i kobal'ta sorbentom na osnove fosfata titana [Kinetics of sorption of cadmium and cobalt cations by titanium phosphate based sorbent]. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2021, vol. 95, issue 10, pp. 1585–1590.

14. Glazkov S. S. Adsorbtsionnye protsessy v usloviyakh izotermicheskoy propitki drevesiny rastvorami oligomerov [Adsorption processes under conditions of isothermal impregnation of wood with oligomer solutions]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2008, vol. 8, issue 3, pp. 454–464.

15. Oblivin A. N., Prokofev N. S., Voskresenskiy A. K. *Protsessy i apparaty proizvodstva drevesnykh plit i plastikov* [Processes and equipment for the production of wood boards and plastics]. Moscow: Ekologiya, 1991. 448 p.

Исхакова Регина Яновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Казань

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0339-9849

Iskhakova Regina Yanovna

Federal state budgetary educational institution of higher education

«Kazan state power engineering university»,

Russian Federation, Kazan.

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department

of «Engineering ecology and labor safety»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0339-9849

Салимов Айнура Ильясович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Российская Федерация, Казань

магистрант

E-mail: salimovajnur31@gmail.com

Salimov Aynur Ilyasovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Kazan State Power Engineering University»

Russian Federation, Kazan

masters student

E-mail: salimovajnur31@gmail.com