

Разработка эффективных методов перемешивания при реагентной обработке суспензии сточных вод

А. Н. Григорьева¹, Р. Ш. Абиев², Ф. И. Лобанов³, О. Ю. Тарарыков⁴



А. Н. Григорьева



Р. Ш. Абиев



Ф. И. Лобанов



О. Ю. Тарарыков

¹ Григорьева Анастасия Николаевна, генеральный директор ГК «Элма-Астерион»

195197, Россия, Санкт-Петербург, проспект Просвещения, 85, тел.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

² Абиев Руфат Шовкетович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 26, тел.: +7 (812) 494-93-39, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

³ Лобанов Федор Иванович, профессор, доктор химических наук, президент ООО «КНТП»

117403, Россия, Москва, Востряковский проезд, 10Б, стр. 2, тел.: +7 (499) 372-14-12, e-mail: f.lobanov@kntp-project.ru

⁴ Тарарыков Олег Юрьевич, президент совета партнерства Союза производителей извести

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73, тел.: +7 (473) 229-41-85, e-mail: nppl.office@yandex.ru

Проблема утилизации осадка сточных вод в последние годы становится все более актуальной для коммунального хозяйства. Приведены результаты исследования процесса суспендирования осадка известьсодержащим реагентом Дезолак, определены размеры твердых включений, что позволило рассчитать необходимую скорость вращения перемешивающего устройства: средний заулеровский диаметр частиц составил 55 мкм, плотность твердой фазы – 2211 кг/м³. Для эффективного суспендирования реагента необходимо обеспечить угловую скорость мешалки не менее 0,03 м/с. Исследованы основные критерии подобия для

масштабирования аппаратов, определено, что при выборе мешалки следует учитывать критерий Фруда Fr , так как именно этот показатель для трех исследованных реакторов практически постоянен. На основании проделанной работы определено, что отношение мощности к объему перемешиваемой жидкости не может являться критерием для расчета аппаратов, оснащенных перемешивающими устройствами GMS: для данных мешалок справедливо снижение мощности на перемешивание с увеличением размеров аппарата.

Ключевые слова: сточные воды, утилизация осадка, перемешивание извести, мешалка, известьсодержащий реагент.

Developing efficient methods of mixing during chemical treatment of wastewater suspension

A. N. Grigor'eva¹, R. Sh. Abiev², F. I. Lobanov³, O. Yu. Tararykov⁴

¹ Grigor'eva Anastasiia, General Director, Elma-Asterion Group

85 Prosveshcheniia Ave., 195197, Saint-Petersburg, Russian Federation, tel.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

² Abiev Rufat, Doctor of Engineering, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

26 Moskovskii Ave., 190013, Saint-Petersburg, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-93-39, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

³ Lobanov Fedor, Professor, Doctor of Chemical Sciences, President of KNTPLLC

Block 2, 10B Vostriakovskii Pass., 117403, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (499) 372-14-12, e-mail: f.lobanov@kntp-project.ru

⁴ Tararykov Oleg, President, Partnership Council of the Union of Lime Producers

73 Lenina St., 394043, Voronezh, Russian Federation, tel.: +7 (473) 229-41-85, e-mail: nppl.office@yandex.ru

In recent years the problem of wastewater sludge disposal has become more and more urgent for the municipal economy. The results of a study of the process of sludge suspending with Dezolak, a lime-containing agent, are presented; the size of solid inclusions is determined to provide for calculating the required rotation speed of the mixing device: the average Sauter particle diameter was 55 μm , the density of the solid phase was 2211 kg/m^3 . For effective chemical suspending the angular velocity of the mixer should be more than 0.03 m/s . The main similarity criteria for scaling the apparatus were investigated; it was determined that while choosing a mixer, the Froude criterion Fr should be taken into account, since that very indicator was practically constant for the three investigated reactors. Based on the work done, it was determined that the ratio of power to the volume of the mixed liquid cannot be a criterion for calculating devices equipped with GMS mixing devices: for these mixers, a decrease in the mixing power with an increase in the size of the device is valid.

Key words: wastewater, sludge disposal, lime mixing, mixer, lime-containing chemical.

Введение

Одной из актуальных проблем, существующих на данный момент в коммунальном хозяйстве, является утилизация образующихся при очистке сточных вод осадков. Вопрос утилизации осадка в течение десятилетий решался путем его вывоза на полигоны, которые представляют собой десятки гектаров безжизненной территории, не пригодной ни для строительства, ни для сельского хозяйства [1].

Наиболее доступной технологией утилизации осадка является его перемешивание с известью или реагентами на ее основе для обеззараживания. Комплексный известьсодержащий реагент Дезолак представляет собой равномерный по химическому составу, мелкодисперсный порошок оксида кальция, обогащенный добавками для улучшения дезинфицирующих и дезодорирующих свойств. Реагент предназначен для обеззараживания и стабилизации осадков сточных вод и стоков животноводческих комплексов с целью их дальнейшего использования в сельском хозяйстве, промышленном цветоводстве и при благоустройстве территорий, а также для биологической рекультивации нарушенных земель, полигонов ТБО и ТКО и восстановления плодородия почв сельскохозяйственного назначения и лесного хозяйства (<https://dezolak.ru>).

В процессе взаимодействия реагента Дезолак с осадком происходит полная дезинфекция за счет высокотемпературной обработки, увеличение водородного показателя pH с 7,5 до 12,5 и частичный переход гидроокисей металлов из коллоидного состояния в нерастворимые оксиды. Для эффективной реакции требуется обеспечение хорошего перемешивания растворов, все частицы реагента должны находиться во взвешенном состоянии.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса суспендирования реагента Дезолак в жидкости, определение реологических свойств суспензии реагента Дезо-

лак, а также изучение вопросов масштабирования результатов лабораторных экспериментов при расчете промышленных аппаратов. Все эти аспекты необходимы для подбора перемешивающих устройств с целью эффективной обработки осадков сточных вод.

Теоретическая часть

Известно, что переход твердого вещества во взвешенное состояние в основном зависит от величины аксиальной составляющей вектора скорости потока, создаваемого мешалкой. Следовательно, процесс суспендирования возможен только в случае, если аксиальная составляющая скорости потока жидкости (w_0) больше или равна скорости осаждения твердой фазы (w_{oc}). Аксиальная составляющая скорости пропорциональна частоте вращения мешалки. При этом концентрация твердого вещества будет уменьшаться в нижней части аппарата и возрастать в верхней. По мере увеличения частоты вращения мешалки система придет в такое состояние, когда концентрация твердой фазы во всем объеме суспензии окажется практически постоянной, и дальнейшее повышение скорости вращения может привести даже к противоположному эффекту (твердые частицы будут увлечены циркуляционным потоком, который создается около мешалки, а на поверхности дна аппарата концентрация их будет минимальна). Таким образом, основной проблемой при расчете аппаратов с перемешивающими устройствами является определение минимально необходимой частоты вращения для поднятия осадка со дна.

Для расчета перемешивающего устройства рассмотрим процесс осаждения твердой шарообразной частицы диаметром $d_{\text{ч}}$, плотность которой $\rho_{\text{ч}}$, в жидкости с плотностью $\rho_{\text{ж}}$.

Чаще всего при перемешивании системы «жидкость – твердое» $\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{ж}}$. Если частицу вводят в жидкость и начальная скорость ее движения будет равна нулю, то она вначале будет двигаться ускоренно, и баланс сил, действующий

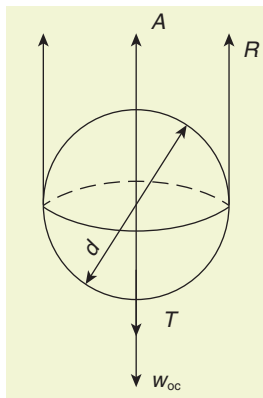


Рис. 1. Силы, действующие на частицу, осаждающуюся в гравитационном поле

щих на нее (рис. 1), можно представить уравнением:

$$T - A - R = J. \quad (1)$$

Сила тяжести, действующая на частицу:

$$T = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} g.$$

Выталкивающая сила, равная по закону Архимеда весу объема вытесненной частицей жидкости:

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ж}} g.$$

Сила сопротивления, отнесенная к поперечному сечению частицы:

$$R = \varphi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{ос}}^2}{2} \rho_{\text{ж}}.$$

Сила инерции:

$$J = m \frac{\partial w_{\text{ос}}}{\partial t} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} \frac{\partial w_{\text{ос}}}{\partial t}.$$

где m – масса частицы, кг; φ – коэффициент сопротивления; $w_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частицы, м/с; t – время, с.

Причем в расчете плотности жидкости следует принимать плотность суспензии, рассчитываемую по формуле:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{1}{\left(\frac{1-x}{\rho_{\text{ж}}}\right) + \frac{x}{\rho_{\text{ч}}}}, \quad (2)$$

где x – массовая концентрация твердого в жидкости, кг/м³.

При условии постоянства скорости осаждения уравнение (1) действующих на частицу сил будет иметь вид:

$$T - A - R = 0,$$

из которого можно выразить величину скорости осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})d_{\text{ч}}g}{3\rho_{\text{ж}}\varphi}}. \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления φ зависит от режима осаждения: ламинарный, переходный и турбулентный. Каждый режим осаждения имеет свой характер обтекания твердой частицы жидкостью. Область существования того или иного режима осаждения определяют величиной критерия Архимеда по формуле:

$$Ar = \frac{gd_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ж}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\mu_{\text{ж}}^2}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

Значения для расчета коэффициентов сопротивления приведены в [2], для турбулентного режима коэффициент сопротивления остается практически постоянным. В этом случае в кормовой части частицы наблюдается регулярный отрыв вихрей. Коэффициент сопротивления определяется в основном лобовым сопротивлением и составляет 0,44.

Если форма осаждающихся частиц отличается от сферической, сопротивление их движению возрастает, а скорость уменьшается в соответствии с поправочными коэффициентами, которые можно найти в [3].

Для проведения эффективного процесса суспендирования следует изначально выбрать форму мешалки, которая вследствие своей геометрии создает преимущественно радиальный (направленный вдоль дна) или осевой (направленный вдоль вала мешалки) поток. Поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в ноль, источником возникновения подъемной силы может служить только горизонтальная составляющая скорости или турбулентные пульсации вблизи днища [4]. Для суспендирования реагента Дезолак в настоящей работе будет использована коническая мешалка GMS, разработанная компанией «Астерион».

Потоки, создаваемые мешалкой, представлены на рис. 2. Лопасте перемешивающего устройства расположены непосредственно у дна емкости, мешалка создает преимущественно радиальный поток, соответственно, форма наиболее эффективна для перемешивания в системе «жидкость – твердое».

При проектировании оборудования в системах «жидкость – твердое» и «жидкость – газ» обычно возникают две проблемы масштабного

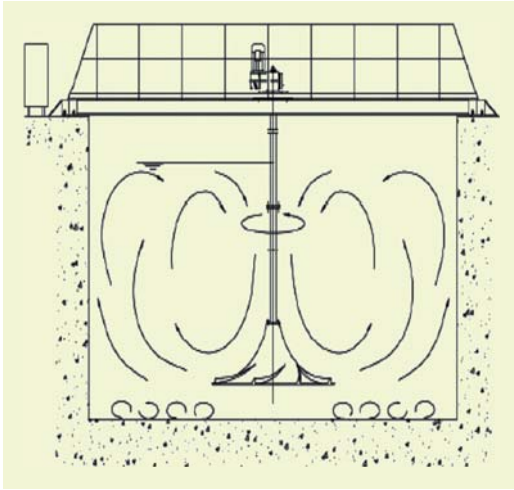


Рис. 2. Структура потока, создаваемого конической мешалкой GMS

перехода: определение мощности, потребляемой мешалкой, и воспроизведение результатов процесса.

Потребляемая мощность мешалки N рассчитывается по формуле [5]:

$$N = k_N \rho n^3 d_m^5, \quad (5)$$

где k_N – критерий мощности перемешивающего устройства; n – частота вращения мешалки, с^{-1} ; d_m – диаметр мешалки, м.

Таким образом, для подбора мешалки наибольшей проблемой является определение скорости вращения мешалки, необходимой и достаточной для осуществления процесса суспендирования.

В иностранной литературе скорость вращения мешалки, необходимая для подъема осадка со дна, обозначается как *just suspend speed* N_{js} . Более подробно расчет представлен в статье [6].

При перемешивании в жидкой фазе необходимо рассматривать три вида подобия: геометрическое, кинематическое и динамическое.

Геометрическое подобие может существовать между двумя аппаратами различных размеров, когда оба они имеют одинаковую форму. Кинематическое подобие между двумя системами различных размеров существует при условии их геометрического подобия и при том, что отношения скоростей в сходственных точках одни и те же. И наконец, между двумя системами существует динамическое подобие, когда в дополнение к геометрическому и кинематическому подобию отношения сил, приложенных в сходственных точках, равны.

Кроме условий геометрического подобия между пилотной и промышленной установками, при масштабных переходах используют следующие условия [7]:

1) постоянство критерия Рейнольдса $Re_{\Pi} = \text{const}$:

$$Re_{\Pi} = \frac{\rho n d_m^2}{\mu}, \quad (6)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;

2) постоянство критерия Фруда $Fr_{\Pi} = \text{const}$:

$$Fr_{\Pi} = \frac{n^2 d_m}{g}, \quad (7)$$

3) постоянство критерия Вебера $We_{\Pi} = \text{const}$:

$$We_{\Pi} = \frac{n^2 d_m^3 \rho}{\sigma}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент поверхностного (межфазного) натяжения, Н/м;

4) постоянство окружной скорости $v = \text{const}$;

5) постоянство мощности, отнесенной к единице объема, $N/V_L = \text{const}$.

Ни один из приведенных критериев масштабных переходов не совместим с любым другим. При суспендировании твердых частиц в перемешиваемой жидкости большое значение имеет окружная скорость мешалки. На практике, однако, нужно выполнить эксперименты на пилотных установках различных объемов, чтобы осуществлять надежные масштабные переходы. То есть при проведении экспериментов необходимо использовать геометрически подобные емкости с различным объемом, провести опыты с достижением оптимальных требуемых параметров технологического процесса, зафиксировать параметры аппарата с мешалкой (потребляемая мощность, частота вращения мешалки, диаметр и т. д.). После проведенных экспериментов необходимо рассчитать все критерии. Масштабные переходы следует осуществлять на основании того критерия, который по результатам расчетов окажется постоянным в том или ином случае.

Исследованием масштабирования экспериментальных результатов при перемешивании в системе «жидкость – твердое» занималась группа чешских авторов [8], которая предложила в качестве критерия использовать модифицированное число Фруда:

$$Fr'' = \frac{N_{js}^2 d_m \rho_{ж}}{g(\rho_{ч} - \rho_{ж})}, \quad (9)$$

характеризующее отношение динамического напора, создаваемого мешалкой, к выталкивающей силе, действующей на частицу.

Отметим, что в числителе формулы (9) использован диаметр мешалки, а в знаменателе

следовало бы использовать диаметр частиц, т. е. формулу (9), по нашему мнению, более логично представить в форме:

$$Fr'' = \frac{N_{js}^2 d_m^2 \rho_{ж}}{g d_{ч} (\rho_{ч} - \rho_{ж})}. \quad (9')$$

Экспериментальная часть

Исходя из теоретических данных, представленных выше, следует отметить, что наиболее важным аспектом подбора перемешивающих устройств является определение размеров твердых включений, подлежащих суспендированию. Размеры частиц активного ила имеют плотность, близкую к плотности воды. Концентрация по сухому веществу составляет не более 5% [9]. Следовательно, основной проблемой при перемешивании реагента Дезолак с осадком сточных вод является поддержание частиц извести во взвешенном состоянии. Исходя из этого, в настоящей работе опыты проводились с использованием суспензии воды и реагента Дезолак, для упрощения работы наличием частиц активного ила в промышленном аппарате пренебрегали.

Как уже было указано выше, одним из ключевых факторов, влияющих на подбор перемешивающего устройства, является определение размеров и плотности твердой фазы. Пробы реагента Дезолак были проанализированы под микроскопом (рис. 3). Фотографии были изучены, частицы измерены при помощи программного

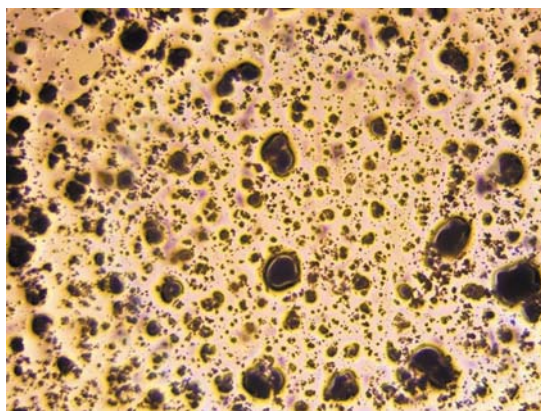


Рис. 3. Фото твердых включений, сделанное при помощи электронного микроскопа (увеличение 1:40)

обеспечения ToarView, в результате чего определены следующие значения: минимальный диаметр частиц 6 мкм; максимальный диаметр частиц 120 мкм; средний диаметр частиц 26 мкм; диаметр Заутера 55 мкм.

Для дальнейших расчетов следует принимать во внимание именно средний объемно-поверхностный диаметр частиц Заутера. Так как в процессе перемешивания следует обеспечить массообмен, смысл усреднения в нашем случае заключается в том, что реакция будет протекать одинаково эффективно при неизменной величине суммарной поверхности частиц дисперсной фазы.

Определение плотности твердой фазы

Дезолак является реагентом на основе негашеной извести. Истинную плотность твердой фазы можно найти в справочной литературе [10] – 2100 кг/м³. Для расчета перемешивающего устройства следует исходить из информации, представленной в теоретической части, что истинная плотность частиц играет одну из ключевых ролей (рис. 4). Для проверки справочных данных была приготовлена суспензия различных концентраций и измерена при помощи ареометра. Зная плотность суспензии и используя формулу (2), можно рассчитать истинную плотность твердой фазы. Результаты экспериментов представлены в табл. 1, пример измерения плотности суспензии – на рис. 5.

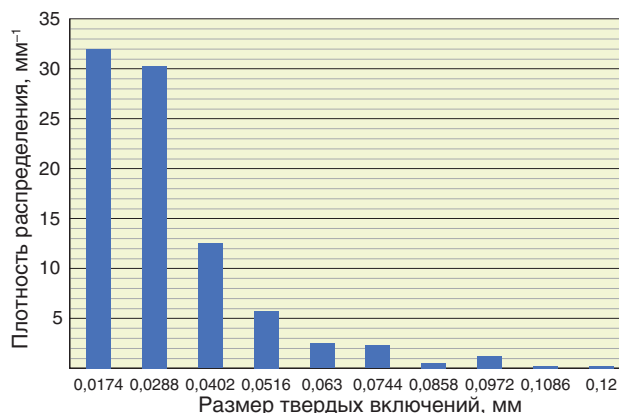


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения твердых включений в зависимости от их размера

Таблица 1

Объем воды, мл	Масса добавляемого порошка, г	Концентрация твердого в суспензии, % (масс.)	Измеренная плотность суспензии, кг/м ³	Расчетная плотность твердой фазы, кг/м ³	Средняя плотность твердой фазы по результатам трех экспериментов, кг/м ³
500	100	20	1123	2215	2211
500	150	30	1197	2210	
500	200	40	1280	2209	



Рис. 5. Пример измерения плотности суспензии реагента Дезолак

Отклонение экспериментального значения от справочных данных составило 5%. Это объясняется тем, что Дезолак представляет собой не чистую известь, а модифицированный добавками реагент. При расчете аппарата с мешалкой следует принимать плотность твердой фазы 2211 кг/м^3 .

Определение минимально необходимой для поднятия частиц со дна частоты вращения мешалки N_{js} при перемешивании реагента Дезолак

Эксперименты проводились с применением суспензии с концентрацией по твердой фазе 2%, так как максимальная промышленная дозировка реагента составляет именно такое значение. Приготовленная суспензия помещалась в емкость, включалась мешалка на минимальной частоте вращения, которая постепенно увеличивалась до тех пор, пока все частицы не приводились в движение. Лабораторные стенды оборудованы зеркалом под дном емкости для возможно-

Параметр	Объем реактора, л		
	4	21	100
D , мм	180	300	500
d_m , мм	72	120	200
D/d_m	2,5	2,5	2,5
C (высота установки мешалки), мм	18 ($D/10$)	30 ($D/10$)	50 ($D/10$)
x , % (масс.)	2	2	2
N_{js} , об/мин	482	274	168
Re	$4,2 \cdot 10^4$	$6,65 \cdot 10^4$	$1,13 \cdot 10^5$
Fr	239	215	224
We	338	506	881
Мощность, потребляемая мешалкой, Вт	0,2	0,037	1,4
Окружная скорость, м/с	0,03	0,029	0,029
Отношение мощности к единице объема, Вт/л	50	22,6	14

сти проведения визуальных наблюдений (рис. 6). Частота вращения мешалки N_{js} фиксировалась. В ходе работы были использованы геометрически подобные емкости цилиндрической формы, для каждого случая были рассчитаны критерии Рейнольдса, Фруда и Вебера и другие критерии подобия.

Результаты проведенных экспериментальных исследований процесса суспендирования реагента Дезолак представлены в табл. 2.

На основании полученных результатов можно заключить, что при масштабировании следует учитывать критерий Фруда Fr, так как именно этот показатель для трех исследованных реакторов практически постоянен. Еще одним критерием можно принимать окружную скорость мешалки. В методике подбора мешалок некоторых иностранных компаний в качестве показателя,



Рис. 6. Внешний вид лабораторных аппаратов

используемого для выбора перемешивающих устройств, встречается отношение мощности к объему перемешиваемой жидкости. На основании проведенных экспериментов можно опровергнуть предположение о том, что данное соотношение приемлемо для масштабирования промышленных аппаратов, оснащенных перемешивающими устройствами GMS: для данных мешалок справедливо снижение мощности на перемешивание с увеличением размеров аппарата.

Выводы

В результате проведенных исследований определены основные реологические свойства суспензии образцов реагента Дезолак: средний диаметр Заутера 55 мкм, плотность твердой фазы 2211 кг/м³. Для эффективного суспендирования реагента необходимо обеспечить угловую скорость мешалки не менее 0,03 м/с. В качестве критерия для масштабирования следует принимать модифицированное число Фруда, рассчитываемое по формуле (9'). Следует отметить, что изучение суспендирования в аппаратах прямоугольной формы является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман К. Б., Лобанов Ф. И., Крюкова Т. В., Магомедов Х. К., Романцова В. Л. Современные технологии утилизации осадков очистных сооружений канализации в Санкт-Петербурге // Профилактическая и клиническая медицина. 2015. № 2 (55). С. 28–33.

2. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. — М.: Химия, 1987. 496 с.
3. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2-х частях. — М.: Химия, 2002.
4. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах. — Л.: Химия, 1984. 336 с.
5. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности / Перевод с чешского, под редакцией И. С. Павлушенко. — Л.: ГХИ, 1963. 416 с.
6. Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. Исследование процесса суспендирования с использованием конической мешалки на примере процесса нейтрализации серной кислоты ОАО «Святогор» // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 12. С. 11–20.
7. Холланд Ф., Чапман Ф. Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов. — М.: Химия, 1974. 208 с.
8. Rieger Ditl. Suspension of solid particles // Chemical Engineering Science. 1994. No. 49. P. 2219–2227.
9. Лобанов Ф. И., Крымская Е. Я., Чукалина Е. М., Гвелесиани Л. А., Кинебас А. К., Рублевская О. Н. Проблемы промышленной безопасности при очистке сточных вод на биологических очистных сооружениях // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 10. С. 50–52.
10. Кабиров М. М., Ленченкова Л. Е., Персиянцев М. Н. Повышение нефтеотдачи неоднородных пластов. — Уфа, УГНТУ, 1998. 255 с.

REFERENCES

1. Fridman K. B., Lobanov F. I., Kriukova T. V., Magomedov Kh. K., Romantsova V. L. [Advanced technologies of wastewater sludge disposal in Saint-Petersburg]. *Profilakticheskaja i Klinicheskaja Meditsina*, 2015, no. 2 (55), pp. 28–33. (In Russian).
2. Planovskii A. N., Nikolaev P. I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi i neftekhimicheskoi tekhnologii* [Processes and apparatus for chemical and petroleum technologies. Moscow, Khimiia Publ., 1987, 496 p.].
3. Dytnerskii Iu. I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Uchebnik dlja vuzov* [Processes and apparatus for chemical technology. In 2 parts. Moscow Khimiia Publ., 2002].
4. Braginskii L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh* [Mixing in liquid environment. Leningrad, Khimiia Publ., 1984, 336 p.].
5. Shterbachek Z., Tausk P. *Peremeshivanie v khimicheskoi promyshlennosti* [Mixing in chemical industry. Translated from Czech, under the editorship of I. S. Pavlushenko. Leningrad, GKHI Publ., 1963, 416 p.].
6. Grigor'eva A. N., Abiev R. Sh. [Study of the suspending process with the use of a conical mixer through the example of the process of sulfuric acid neutralization at Sviatogor JSC]. *Vodostabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2020, no. 12, pp. 11–20. (In Russian).
7. Khollland F., Chapman F. *Khimicheskie reaktsii i smesiteli dlja zhidkofaznykh protsessov* [Chemical reactors and mixers for liquid-phase processes. Moscow Khimiia Publ., 1974, 208 p.].
8. Rieger Ditl. Suspension of solid particles. *Chemical Engineering Science*, 1994, no. 49, pp. 2219–2227.
9. Lobanov F. I., Krymskaia E. Ia., Chukalina E. M., Gveliesiani L. A., Kinebas A. K., Rublevskaia O. N. [Aspects of the industrial safety in the process of wastewater treatment at the biological wastewater treatment facilities.]. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2012, no. 10, pp. 50–52. (In Russian).
10. Kabirov M. M., Lenchenkova L. E., Persiantsev M. N. *Povyshenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov* [Enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs. Ufa, UGNTU, 1998, 255 p.].