

ГИДРОДИНАМИКА И МАССООБМЕН В АППАРАТАХ С МЕШАЛКАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕАКЦИИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АГРЕССИВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

А. Н. Григорьева¹, Р. Ш. Абиев²

¹ АО «Астерион, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: an@td-elma.ru;

² СПбГТИ(ТУ), Россия, Санкт-Петербург, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

Аннотация: обеспечение экологической безопасности предприятия является достаточно актуальной проблемой современного производства. Агрессивные сточные воды, образующиеся в технологическом процессе, подлежат нейтрализации в аппаратах с мешалками. Химическая реакция нейтрализации мгновенная, следовательно, основным лимитирующим фактором является аппаратурное оформление процесса с обеспечением поддержания извести во взвешенном состоянии всех частиц для увеличения площади поверхности контакта фаз. Целью настоящей работы является теоретический анализ перемешивания в системе жидкость–твердое [1], который позволяет разработать новую конструкцию мешалки для суспендирования твердых частиц. Рассмотрены критерии масштабирования результатов лабораторных экспериментов. Экспериментальная часть проведена на примере процесса нейтрализации серной кислоты известковым молоком на предприятии ОАО «Святогор». Разработана методика расчета конической мешалки для процессов суспендирования в системе жидкость–твердое. Посредством внедрения новой конструкции перемешивающего устройства удалось сократить время проведения реакции нейтрализации в 2 раза при сокращении энергопотребления на 36%.

Ключевые слова: суспендирование, нейтрализация, серная кислота, перемешивающее устройство, известковое молоко, критерий эффективности мешалки, энергопотребление мешалки, промышленные испытания.

Для цитирования: Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. Гидродинамика и массообмен в аппаратах с мешалками при проведении реакции нейтрализации агрессивных сточных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5–2. – С. 209–219. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_209.

Hydrodynamics and mass exchange in apparatus with mixers during the reaction of neutralization of aggressive waste water

A. N. Grigorieva¹, R. Sh. Abiev²

¹ JSC Asterion, Russia, St. Petersburg, e-mail: an@td-elma.ru;

² St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

Abstract: Ensuring the environmental safety of the enterprise is a rather urgent problem of modern production. Aggressive wastewater generated in the technological process must be

neutralized in apparatus with agitators. The chemical reaction of neutralization is instantaneous, therefore, the main limiting factor is the hardware design of the process to ensure that all lime particles are kept in suspension in order to increase the surface area of phase contact. The purpose of this work is a theoretical analysis of mixing in a liquid-solid system [1], which allowed the development of a new design of a stirrer for suspending solid particles in a liquid. The criteria for scaling the results of laboratory experiments are considered. The experimental part was carried out on the example of the process of sulfuric acid neutralization with lime milk in the enterprise JSC "Svyatogor". A method for calculating a conical mixer for suspension processes in a liquid-solid system has been developed. Through the introduction of a new design of the mixing device, it was possible to reduce the neutralization reaction time by 2 times while reducing energy consumption by 36%.

Key words: suspension, neutralization, sulfuric acid, agitator, milk of lime, agitator efficiency criterion, agitator power consumption, industrial tests.

For citation: Grigorieva A. N., Abiev R. Sh. Hydrodynamics and mass exchange in apparatus with mixers during the reaction of neutralization of aggressive waste water. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–2):209–219. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_209.

Введение

В процессе переработки руд на горно-обогатительных комбинатах (ГОК) образуется большое количество отходов, в том числе сточных вод, загрязненных кислотами и солями тяжелых металлов. Сточные воды ГОК являются огромной проблемой, требующей особого внимания со стороны предприятий, так как сброс недостаточно очищенной воды в водоемы негативно сказывается на окружающей среде. Существующая технология обработки стоков комбинатов основана на реакции нейтрализации известью с образованием гидроксидов тяжелых металлов и сульфата кальция [1, 2].

Известен также способ очистки сточных вод, предусматривающий совместное применение щелочных реагентов и флокулянтов [3]. Данный метод направлен на увеличение скорости образования осадка при реагентной обработке для его дальнейшего более простого обезвоживания.

В большинстве случаев нейтрализация агрессивных сточных вод проводится в аппаратах с перемешивающими устройствами. Химическая реакция данного процесса имеет высокую ско-

рость, следовательно, эффективность выравнивания pH во многом зависит от гидродинамической обстановки в аппарате с мешалкой. В случае образования залежей извести на дне емкости возникает объем реагента, не вступившего в реакцию. Это способствует снижению скорости нейтрализации всего объема аппарата, сбросу кислых стоков на последующие стадии очистки воды [4].

Целью настоящей работы является теоретический и экспериментальный анализ процесса суспендирования с использованием конической мешалки нового типа, а также подбор оптимальной геометрии энергосберегающей мешалки [5] на примере процесса нейтрализации известковым молоком раствора серной кислоты на предприятии ОАО «Святогор».

Теоретическая часть

Суспендирование твердого в жидкости требует ввода механической энергии в аппарат посредством некоторого режима перемешивания. Вводимая энергия создает поле скоростей турбулентного потока, в котором твердые частицы отрываются от дна,

а затем распределяются по всему объёму. Захват потоком твердых частиц достигается за счет сочетания силы сопротивления и подъемной силы движущейся жидкости, воздействующей на твердые частицы, а также турбулентных пульсаций. Распределение и величина средних скоростей потока, размер создаваемых мешалкой турбулентных вихрей определяют, в какой степени может быть достигнута равномерность распределения концентрации твердого вещества. Таким образом, различные конструкции перемешивающих устройств обеспечивают разную степень однородности при одинаковом потреблении энергии.

Мелкие твердые частицы, плотность которых примерно равна плотности жидкости, обычно не вызывают проблем, суспензия ведет себя как однофазная жидкость при низких концентрациях твердого вещества. Для более тяжелых твердых частиц их скорости будут отличаться от скорости жидкости.

Для аппаратурного оформления суспендирования необходимо располагать следующими данными: физико-химические свойства жидкости (плотность, вязкость), свойства твердой фазы (размеры твердых включений и их плотность, геометрическая форма,

характеристики смачиваемости поверхности, склонность к агломерации, твердость), параметры технологического процесса (наличие пузырьков газа, концентрация твердых включений), геометрические параметры аппарата (размеры, высота заполнения, геометрическая форма перемешивающего устройства, высота установки мешалки от дна, наличие внутренних устройств); параметры процесса перемешивания (частота вращения мешалки, расходуемая на перемешивание мощность, требуемая равномерность распределения частиц по объёму).

Известны различные режимы суспендирования твердых включений в жидкости [6]:

1) перемешивание, обеспечивающее отрыв от дна твердых включений без осаждения на поверхность не более чем на 2 секунды (рис. 1, а);

2. суспендирование в нижней области аппарата без создания равномерной концентрации по его оси (рис. 1, б);

3. Создание равномерного распределения по всей высоте аппарата (рис. 1, в) [7].

Равномерная суспензия соответствует состоянию, при котором концентрация частиц практически однородна по всему аппарату; любое дальнейшее увеличение скорости или мощности

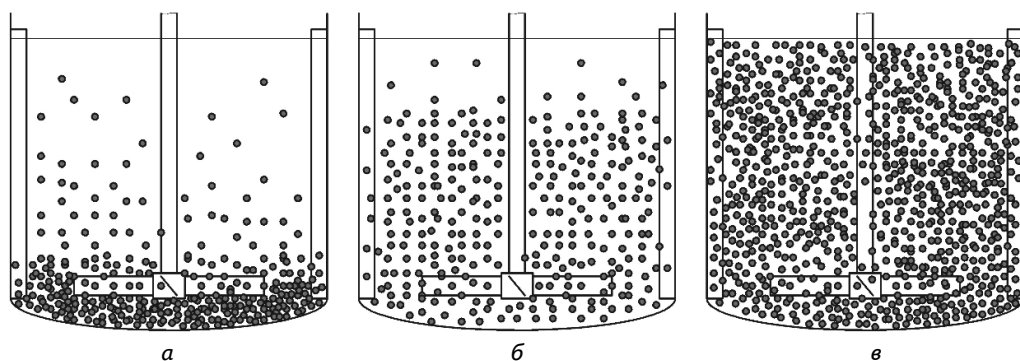


Рис. 1. Различные режимы суспендирования частиц [8]: а — движение частиц вдоль дна; б — суспендирование в придонной области; в — распределение частиц по всей высоте аппарата
 Fig. 1. Various modes of particle suspension [8]: а — particle movement along the bottom; б — suspension in the bottom region; в — particle distribution over the entire height of the apparatus

перемешивания не приводит к заметному увеличению распределения твердых частиц в жидкости. Очевидно, что для создания равномерной суспензии (рис. 1, в) требуется больше энергетических затрат, чем для обеспечения режима витания (рис. 1, а). Для проведения массообмена между твердой и жидкой фазой необходимо обеспечить обтекание частиц жидкостью, чтобы создать достаточно развитую турбулентность вокруг зерен в целях уменьшения толщины ламинарного слоя на границе жидкости–твердое [9]. Проведение нейтрализации, когда твердые частицы известны сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис 1, б), позволяет экономить электроэнергию, расходуемую на перемешивание.

При проектировании перемешивающих устройств для суспендирования твердых частиц основной проблемой является определение скорости вращения мешалки, минимально достаточной для поднятия всех частиц со дна.

При расчете аппарата с перемешивающим устройством плотность суспензии рассчитывается по формуле:

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{1-x}{\rho_{ж}} + \frac{x}{\rho_{ч}}}, \quad (1)$$

где ρ_c — плотность суспензии, кг/м³;

$\rho_{ж}$ — плотность жидкой фазы, кг/м³;

$\rho_{ч}$ — плотность твердой фазы, кг/м³;

x — массовая концентрация твердой фазы в суспензии.

Величина скорости осаждения частицы выражается уравнением

$$w_{ос} = \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_{ч} - \rho_{ж}) \cdot d_{ч} \cdot g}{3 \cdot \rho_{ж} \cdot \varphi}}, \quad (2)$$

где $d_{ч}$ — диаметр частицы, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; φ — коэффициент гидродинамического сопротивления частицы.

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 (3):

$$Ar = \frac{g \cdot d_{ч} \cdot \rho_{ж} \cdot (\rho_{ч} - \rho_{ж})}{\mu_{ж}^2}, \quad (3)$$

где $\mu_{ж}$ — коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Значения для расчета коэффициентов сопротивления подробно изложены в [10], для турбулентного режима коэффициент сопротивления остается практически постоянным. В этом случае в кормовой части наблюдается регулярный отрыв вихрей. Если форма осаждающихся частиц отличается от сферической, сопротивление их движению возрастает, а скорость уменьшается в соответствии с поправочными коэффициентами.

Известно, что существуют геометрические формы мешалок, которые создают преимущественно радиальный (направленный вдоль дна) или осевой (направленный вдоль вала мешалки) поток. Поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в нуль, источником возникновения подъемной силы могут служить только горизонтальная составляющая скорости или турбулентные пульсации вблизи днища [7]. Перемешивающие устройства, создающие радиальный поток, способствуют эффективному суспендированию твердых включений.

В иностранной литературе скорость вращения мешалки, необходимая для подъема осадка со дна, обозначается как “just suspend speed” N_{js} . Многочисленные исследования на эту тему

провел Цвитеринг [11] и другие авторы [12 – 15]. На всемирной конференции по перемешиванию, проходившей в г. Тулуза в 2018 г., сообщалось [16], что зависимость, предложенная Цвитерингом, неприменима для высококонцентрированных суспензий (от 45% объемной концентрации твердого вещества), так как происходит соударение частиц при их осаждении, движение твердого происходит в ламинарном режиме.

В 2014 году в статье Айранчи и Кресты [17] теория Цвитеринга была дополнена. Для расчета критической частоты вращения мешалки N_{js} была разработана новая формула:

$$N_{js} = A \cdot \left(\frac{g \cdot (\rho_c - \rho_j)}{\rho_j} \right)^{0,5} \times \frac{d_c^{1/6} \cdot \chi^n \cdot D}{K_M^{1/3} \cdot d^{2/3} \cdot d_M}, \quad (4)$$

где A — константа, зависящая от геометрии мешалки и свойств твердых частиц; n — коэффициент ($n = 0,23$); d_M — диаметр мешалки, м; D — диаметр емкости, м; K_M — коэффициент мощности мешалки.

Для проведения суспендирования пульпы известняка авторами выбрана коническая мешалка, геометрическая форма которой представлена на рис. 2.

Еще одним немаловажным фактом для проведения работы по расчету перемешивающего устройства для промышленного аппарата является пра-

вильное масштабирование результатов экспериментов. Группа чешских авторов [18] предложила модифицированное число Фруда:

$$Fr = \frac{N_{js}^2 \cdot d_j \cdot \rho}{g \cdot (\rho_c - \rho_j)}. \quad (5)$$

Данный параметр характеризует отношение динамического напора, создаваемого мешалкой, к выталкивающей силе, действующей на частицу.

Отметим, что в числителе формулы (5) использован диаметр мешалки, а в знаменателе, по нашему мнению, следовало бы использовать диаметр частиц, т.е. формулу (5) более логично представлять в следующей форме:

$$Fr = \frac{N_{js}^2 \cdot d_j^3 \cdot \rho}{g \cdot d_c^2 \cdot (\rho_c - \rho_j)}. \quad (5a)$$

Методы

Необходимым условием увеличения скорости реакции нейтрализации серной кислоты известковым молочком и достижения требуемого уровня pH является отсутствие залежей на дне аппарата, т.е. максимальное количество частиц извести должно вступить в реакцию с серной кислотой.

Для расчета перемешивающего устройства в первую очередь необходимо определить диаметр частиц твердых включений для последующего расчета скорости их осаждения. Были взяты пробы известкового молочка

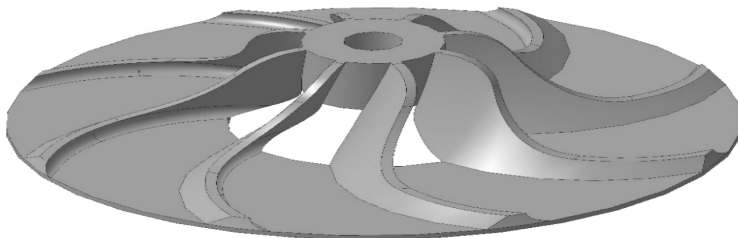
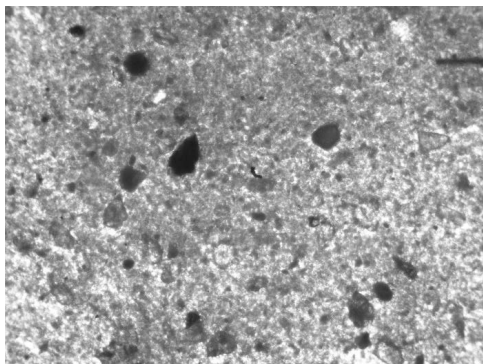


Рис. 2. Фотография конической мешалки [5]
Fig. 2. Photo of a conical agitator [5]



а



б

Рис. 3. Фото твердых включений: а — известковое молочко; б — глиняная пульпа
Fig. 3. Photos of solid inclusions: a — lime milk; b — clay pulp

и глиняной пульпы. Образцы данных суспензий изучены под электронным микроскопом, и сделанные фотографии (рис. 3, а и б) обработаны с целью определения диаметра Заутера.

В процессе исследования (подробно метод описан в [19]) определены размеры твердых включений (средний диаметр составил 24 мкм для известкового молочка и 120 мкм для глиняной пульпы).

Расчет среднего диаметра по Заутеру проведен по методике из [20]. В глиняной пульпе обнаружены твердые включения, диаметр которых намного превышает частицы известкового молочка. Это объясняется тем, что в процессе химической реакции зерно покрывается гипсом и укрупняется в размере.

Сохранение крупных частиц негативно сказывается на скорости нейтрализации, так как поверхность зерна под слоем гипса не «работает», для дальнейшего хода реакции поверхность нужно обновить (пассивировать). Поэтому при установке мешалки было принято решение обеспечить подачу серной кислоты в район максимальных турбулентных пульсаций. Кроме того, геометрическая форма новой мешалки содержит 8 лопастей, по сравнению с традиционными конструкциями пло-

щадь обмена импульсом существенно выше, за один оборот перемешивающего устройства для нейтрализации мешалкой подводится 8 новых доз известкового молочка (рис. 4).

Процесс нейтрализации серной кислоты известковым молоком происходит в шести реакторах, которые работают в периодическом режиме с продолжительностью цикла 60 минут и четырьмя временными отрезками: заполнение аппарата, дозированная подача серной кислоты, созревание гипса, расквашивание гипсовой пульпы из аппарата.

В промышленном аппарате до модернизации были установлены лопастные мешалки, перемешивание которыми не обеспечивало отсутствие отложений известки на дне аппарата. Под мешалками образовывались залежи в центре емкости из-за встречного восходящего потока, подобно ситуации, описанной в [17]. Для достижения технико-экономического эффекта в реактор установлена коническая мешалка со следующими техническими характеристиками: мощность двигателя — 5,5 кВт, частота вращения — 43 об/мин, диаметр мешалки — 2000 мм, длина вала — 5900 мм. Мотор-редуктор оборудован частотным преобразователем для возможности варьирования

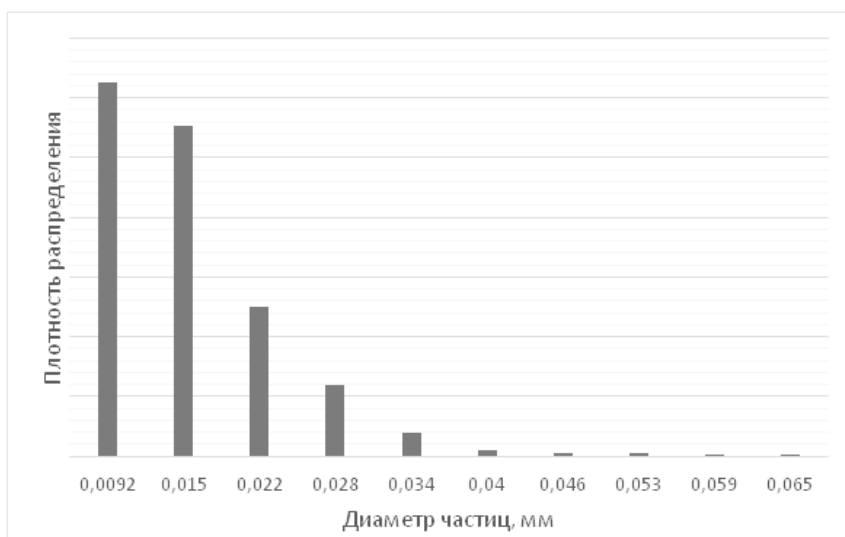


Рис. 4. Пример гистограммы плотности распределения диаметра частиц одной из проб известкового молочка

Fig. 4. Example of a histogram of the density distribution of the diameter of particles of one of the samples of lime milk

частоты вращения мешалки. В реакторе на высоте 3 метра от дна был установлен датчик pH , показания которого выводились на пульт управления, мониторинг кислотности раствора производился непрерывно по мере

прохождения реакции. При полной нейтрализации раствора мешалка останавливалась, гипсовая пульпа сливалась, цикл повторялся снова. Фотографии мешалки до модернизации и новой представлены на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Аппарат с мешалкой: а — до модернизации, б — в процессе сборки новой мешалки
Fig. 5. The device with a stirrer: a — before modernization, b — during the assembly of a new stirrer

Анализ результатов

При запуске мешалки на 43 об/мин был подтвержден расчет, проведенный в рамках лабораторных исследований. При внедрении нового перемешивающего устройства сокращено время проведения реакции с 60 минут до 30. Кислота поступает в емкость и попадает в зону действия мешалки, нейтрализация проходит за считанные секунды.

Заключение

В результате проведенной работы доказано, что разработанная нами мешалка конической формы наилучшим образом подходит для суспендирования твердых частиц в жидкости: при более эффективной работе наблюдается снижение потребляемой мощности. Положительный результат был достигнут по следующим причинам:

1. Поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в нуль, источником возникновения подъемной силы могут служить только горизонтальная составляющая скорости или турбулентные пульсации вблизи днища. Для

суспендирования применена геометрия мешалки, создающая преимущественно радиальную скорость потока, что привело к отсутствию осадка на дне.

2. Новая мешалка по сравнению с турбинной скруглена, имеет обтекаемую форму, что положительно сказывается на энергопотреблении. В результате удалось снизить потребляемую мощность по сравнению с существующей мешалкой в 1,8 раза.

3. Реакция нейтрализации проходит на дне емкости, кислота подается в реактор в зону максимальных турбулентных пульсаций, что привело к сокращению времени проведения процесса в 2 раза.

4. Благодаря тому, что поток направлен от поверхности к дну аппарата, сила, действующая на подшипники мотор-редуктора, направлена не вверх (как у лопастных мешалок), а вниз. Данное обстоятельство позволяет отказаться от промежуточных подшипниковых опор, что ведет к удешевлению и упрощению оборудования, а также к более низким затратам на проведение периодического технического обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2738083 С1, 07.12.2020. *Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.* Перемешивающее устройство. 2020.
2. *Костилов Е. А.* Проведение реакции нейтрализации кислого стока известью с последующим отстаиванием осадка в одном аппарате // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля. Материалы Международной научно-методической конференции, посвященной 60-летию филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате. — Салават: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. — С. 388–389.
3. *Корчина Л. В.* Совершенствование процесса очистки промышленных сточных вод // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. — Балаково: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. — С. 132–137.
4. *Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Воронов Ю. В.* Очистка производственных сточных вод. — М.: Стройиздат, 1985. — 336 с.
5. *Царев Н. С.* Способы интенсификации работы нейтрализационных сооружений агрессивных производственных сточных вод // Черная металлургия. Бюллетень

научно-технической и экономической информации. — 2020. — Т. 76. — № 11. — С. 1149–1153. DOI 10.32339/0135–5910–2020–11–1149–1153.

6. *Lin F. Y., Shao S.* EKATO Handbook of Mixing Technology // Schopfheim: Wear. 1991, vol. 143, pp. 231–240.

7. *Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М.* Перемешивание в жидких средах. — Л.: Химия, 1984. — 336 с.

8. *Paul E. L., Atiemo-Obeng V. A., Kresta S. M.* Industrial mixing handbook: Science and practice. Canada: A JOHN WILEY & SONS, 2004, 1432 p.

9. *Стренк Ф.* Перемешивание и аппараты с мешалками / Под ред. Л. Е. Щупляка. — Л.: Химия, 1971. — 384 с.

10. *Плановский А. Н., Николаев П. И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: 3-е изд. — М.: Химия, 1987. — 300 с.

11. *Zwietering T. N.* Suspending of solid particles in liquid by agitators // Chemical Engineering Science, 1958, Vol. 8, pp. 244–253. DOI:10.1016/0009–2509(58)85031–9.

12. *Bertrand O., Blais B., Bertrand F., Fradette L.* Complementary methods for the determination of the just-suspended speed and suspension state in a viscous solid–liquid mixing system // Chemical Engineering Research and Design. 2018, vol. 136, pp. 32–40. DOI:10.1016/j.cherd.2018.04.035.

13. *Cohen B. M., Inankur B., Lauser K. T., Lott J., Chen W.* Evaluation of Just-Suspended Speed Correlations in Lab-Scale Tanks with Varying Baffle Configurations // Organic Process Research & Development. 2018, vol. 22, no. 11, pp. 1481–1488. DOI:10.1021/ACS.OPRD.8B00244.

14. *Teoman B., Shastry Sh., Abdelhamid S., Armenante P. M.* Imaging method for the determination of the minimum agitation speed, N_{js} , for solids suspension in stirred vessels and reactors // Chemical Engineering Science. 2021, vol. 231, pp. 921–930. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116263>.


15. *Sirasitthichoke Ch., Teoman B., Thomas J., Armenante P. M.* Computational prediction of the just-suspended speed, N_{js} , in stirred vessels using the lattice Boltzmann method (LBM) coupled with a novel mathematical approach // Chemical Engineering Science, 2022, Vol. 251. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117411>.

16. *Janurin N. S., Choong Ch. E., Zamzam Z., Ibrahim Sh.* Suspension Characteristics of Fine Particles at High Loadings in Flat and Dished Base Tanks // 16th European Conference on Mixing. — Toulouse, France, 2016.

17. *Ayranci In., Kresta S. M.* Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks // Chemical Engineering Research and Design. 2014, vol. 92, pp. 413–422. DOI:10.1016/j.cherd.2013.09.005.

18. *Rieger D.* Suspension of solid particles // Chemical Engineering Science. 1994, vol. 49, pp. 2219–2227. DOI:10.1016/0009–2509(94)E0029-P.

19. *Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.* Сравнительный анализ влияния геометрической формы рабочих колес перемешивающих устройств на эффективность суспендирования в системе жидкость–твердое // Известия СПбГТИ(ТУ). — 2018. — № 45. — С. 94–97.

20. *Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.* Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ–жидкость // Химическая промышленность сегодня. — 2019. — № 5. — С. 18–22. 

REFERENCES

1. Grigorieva A. N., Abiev R. Sh. Patent RU 2738083 C1, 07.12.2020. [In Russ].
2. Kostikov E. A. Carrying out the acid runoff neutralization reaction with lime with subsequent preservation of sediment in one apparatus, Integration of science and education in oil and gas universities. *Materials of the International scientific and methodological conference dedicated to the 60th anniversary of the branch of the Ufa State Petroleum*

Technological University in the city of Salavat. Salavat: Ufa State Oil Technical University, 2016, pp. 388–389. [In Russ].

3. Korchina L. V. Improving the process of industrial wastewater treatment. *Actual problems and ways of development of energy, engineering and technology. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Balakovo: National Research Nuclear University “MIFI”. 2019, pp. 132–137. [In Russ].

4. Yakovlev S. V., Karelin Ya. A., Laskov Yu. M., Voronov Yu. V. Purification of industrial wastewater, Moscow, Stroyizdat, 1985, 336 p. [In Russ].

5. Tsarev N. S. Ways to intensify the work of neutralization preventive aggressive industrial wastewater. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2020, vol. 76, no. 11, pp. 1149–1153. DOI 10.32339/0135 – 5910 – 2020 – 11 – 1149 – 1153. [In Russ].

6. Lin F. Yu., Shao S. Ekato. Handbook of mixing technology. *Schopfheim: Wear*. 1991, vol. 143, pp. 231–240.

7. Braginsky L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. Mixing in liquid media, Leningrad, Khimiya, 1984, 336 p. [In Russ].

8. Paul E. L., Atiemo-Obeng V. A., Kresta S. M. *Industrial mixing handbook: Science and practice*. Canada: A JOHN WILEY & SONS, 2004, 1432 pp.

9. Strenck F. Mixing and devices with stirrers. Ed. by L. E. Shchuplyak, Leningrad, Khimiya, 1971, 384 p. [In Russ].

10. Planovsky A. N., Nikolaev P. I. Processes and devices of chemical and petrochemical technology, 3rd ed., Moscow, Chemistry, 1987, 300 p. [In Russ].

11. T. N. Zvitering, Weighing solid particles in a liquid with agitators. *Khim. Mashinostroenie*. 1958, vol. 8, pp. 244–253. DOI: 10.1016/0009 – 2509(58)85031 – 9.

12. Bertrand O., Blais B., Bertrand F., Fradette L. Additional methods for determining the speed of a freshly suspended state and the state of suspension in a viscous solid-liquid mixing system. *Research and design in the field of chemical technology*. 2018, vol. 136, pp. 32–40. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.04.035.

13. Cohen B. M., Inancur B., Lauser K. T., Lott J., Chen V. Evaluation of just-suspended velocity correlation in laboratory tanks with different baffle configurations. *Research and Development in Organic Processes*. 2018, vol. 22, no. 11, pp. 1481–1488. DOI: 10.1021/ACS.OPRD.8B00244.

14. Teoman B., Shastry Sh., Abdelhamid S., Armenante P. M. Visual Method for Determination of Minimum Stirring Rate, Njs, for Suspension of Solids in Stirred Vessels and Reactors. *Chemical Engineering*, 2021. Vol. 231, pp. 921–930. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116263>.

15. Sirasittichoke C., Theoman B., Thomas J., Armenante P. M. Computational Prediction of Freshly Suspended Velocity, Njs, in Stirred Vessels Using the Lattice Boltzmann Method (LBM) Combined with a New Mathematical Approach. *Chemical Engineering*. 2022, vol. 251. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117411>.

16. Dzhannur N. S., Chun Ch. E., Zamzam Z., Ibrahim Sh. Characteristics of fine particles suspension at high loads in flat and concave trays. *16th European Conference on Mixing*. Toulouse, France, 2016.

17. Airanchi I. N., Kresta S. M. Critical Analysis of the Zvitering Correlation for Suspended Solids in Mixers. *Chemical Engineering Research and Development*. 2014, vol. 92, pp. 413–422. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.09.005.

18. Rieger D. Suspensions of solid particles. *Chemical engineering*. 1994, vol. 1, p. 49, pp. 2219–2227. DOI: 10.1016/0009 – 2509(94)E0029-P.

19. Grigorieva A. N., Abiev R. Sh. Comparative analysis of the analysis of the geometric shape of working wheel mechanisms for the efficiency of suspension in a liquid-solid

system. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2018, no. 45, pp. 94–97. [In Russ].

20. Grigorieva A. N., Abiev R. Sh. Influence of the geometry of a changing device on the diameter of air bubbles when changing in the gas-liquid system. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2019, no. 5, pp. 18–22. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьева Анастасия Николаевна — канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-6825-7003>, генеральный директор ООО «Астерион», 195197, Россия, Санкт-Петербург, проспект Просвещения, 85, an@td-elma.ru;

Абиев Руфат Шовкетович — докт. техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3571-5770>, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 26, rufat.abiev@gmail.com.

Для контактов: *Григорьева А. Н.*, e-mail: an@td-elma.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigorieva A. N., Cand. Sci. (Eng.), <https://orcid.org/0000-0001-6825-7003>, General Director of Asterion LLC, 195197, Russia, St. Petersburg, Prosveshcheniya, 85, an@td-elma.ru;

Abiev R. Sh., Dr. Sci. (Eng.), Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3571-5770>, Head of the Department “Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment”, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 190013, Russia, St.-Petersburg, Moskovsky prospect, 26, rufat.abiev@gmail.com.

Получена редакцией 01.10.2021; получена после рецензии 05.04.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 01.10.2021; received after the review 05.04.2022; accepted for printing 10.04.2022.

