

УДК 621.929

Исследование процесса суспендирования с использованием конической мешалки на примере процесса нейтрализации серной кислоты ОАО «Святогор»

А. Н. Григорьева¹, Р. Ш. Абиев²



А. Н. Григорьева



Р. Ш. Абиев

¹ Григорьева Анастасия Николаевна, генеральный директор АО «Астерион»; аспирант кафедры «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) 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) 494-92-76, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

Рассматривается процесс суспендирования твердых частиц в жидкости при помощи механического перемешивания. Разработана и описана методика подбора перемешивающих устройств с учетом геометрии мешалки. В основе методики лежит полуэмпирическая модель Цвитеринга, дополненная в ходе дополнительных исследований Айранчи и Креста. Изучены различные режимы процесса суспендирования. На основании теоретических зависимостей разработана и протестирована в лабораторных условиях коническая мешалка с особой геометрией лопастей, что позволило сделать процесс суспендирования наиболее энергоэффективным. Вычислен эмпирический коэффициент суспендирования Цвитеринга и Айранчи–Креста, что позволило рассчитывать необходимые параметры ме-

шалки в масштабах промышленных реакторов. Эффективность работы нового перемешивающего устройства подтверждена в ходе проведения промышленных испытаний в химическом реакторе гашения серной кислоты известковым молоком. Благодаря применению мешалки конической формы скорость проведения реакции сократилась с 60 до 38 минут при снижении потребления электроэнергии на 40%. Доказано, что для интенсификации процесса нейтрализации достаточным условием является исключение оседания взвешиваемого осадка на дно реактора, т. е. необходимо интенсифицировать процесс суспендирования в придонной области.

Ключевые слова: коническая мешалка, перемешивание, суспендирование, нейтрализация, серная кислота.

ADVANCED TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

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

A. N. Grigor'eva¹, R. Sh. Abiev²

¹ Grigor'eva Anastasiia, General Director, Asterion JSC; Post-graduate Student of the Department of Chemical and Biotechnological Equipment Upgrade, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) 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 Chemical and Biotechnological Equipment Upgrade, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) 26 Moskovskii Ave., 190013, Saint-Petersburg, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-92-76, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

The process of suspending solid particles in a liquid by means of mechanical mixing is considered. A technique for the selection of mixing devices with account of the geometry of the mixer has been developed and described. The methodology is based on the semi-empirical Zwietering model, supplemented in the course of additional studies by Ayranchi and Kresta. Various modes of the suspending process have been studied. On the basis of theoretical relationships, a conical mixer with a special blade geometry was developed and tested in laboratory conditions resulting in a highly efficient suspending process. The empirical suspending coefficient of Zwietering and Ayranchi–Kresta was calculated resulting in the possibility to calculate the required parameters of the mixer on a scale of industrial reactors. The efficiency of the new mixing device was proved during industrial tests in a chemical reactor for quenching sulfuric acid with lime milk. Owing to the use of a conical mixer the reaction rate was reduced from 60 to 38 minutes with a 40% reduction in electricity consumption. It is proved that a sufficient condition for the enhancement of the neutralization process will be eliminating the sedimentation of the suspended sludge to the bottom of the reactor, i.e. the suspending process in the bottom part shall be enhanced.

Key words: conical mixer, mixing, suspending, neutralization, sulfuric acid.

Введение

Применяемые в промышленности аппараты с мешалками (более 50%) предназначены для перемешивания жидких сред, содержащих твердые частицы [1]. На практике, однако, чаще встречается перемешивание гетерогенных систем (в частности, суспендирование твердого вещества в жидкости), сопровождаемое широко распространенными процессами растворения, экстракции твердых веществ, гетерогенными химическими реакциями и т. д. Одним из примеров перемешивания в системе «жидкость – твердое» является реализованная в ОАО «Святогор» технология нейтрализации серной кислоты. Технология основана на том, что готовое известковое молоко (плотность 1,08–1,1 г/см³, pH 7,6–7,7) и техническая серная кислота (плотность 1,82–1,83 г/см³, концентрация 94% масс.) одновременно и дозированно в объемном соотношении 18:1 поступают в аппараты с перемешивающими устройствами. В ходе интенсивного смешивания карбонаты кальция и магния вступают в реакции с серной кислотой с образованием двуводного гипса, сульфата магния и углекислоты, которая, в свою очередь, разлагается на воду и углекислый газ [2].

Целью настоящей работы является теоретический и экспериментальный анализ процесса суспендирования с использованием конической мешалки нового типа (другое название – гиперболическая), а также подбор оптимальной геометрии энергосберегающей мешалки [3] на примере процесса нейтрализации известковым молоком раствора серной кислоты предприятия ОАО «Святогор».

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 том случае, когда аксиальная составляющая скорости потока жидкости (w_0) больше или равна скорости осаждения твердой фазы (w_{oc}). Аксиальная составляющая скорости про-

порциональна частоте вращения мешалки. При этом концентрация твердого вещества будет уменьшаться в нижней части аппарата и возрастать в верхней части. По мере увеличения частоты вращения мешалки система придет в такое состояние, когда концентрация твердой фазы во всем объеме суспензии окажется практически постоянной. При этом дальнейшее увеличение скорости вращения может привести к противоположному эффекту (твердые частицы будут увлечены циркуляционным потоком, который создается около мешалки, а на поверхности дна аппарата концентрация их будет минимальной). Таким образом, основной проблемой при расчете аппаратов с перемешивающими устройствами является определение минимально необходимой частоты вращения для поднятия осадка со дна.

В практике перемешивания различают различные режимы суспендирования твердых включений в жидкости [4]:

- 1) создание скорости потока, при которой твердые включения движутся вдоль дна, оседая на поверхность не более чем за 2 секунды (рис. 1, а);
- 2) суспендирование в придонной области, когда твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 1, б);
- 3) создание равномерной концентрации (причем равномерное распределение является при-

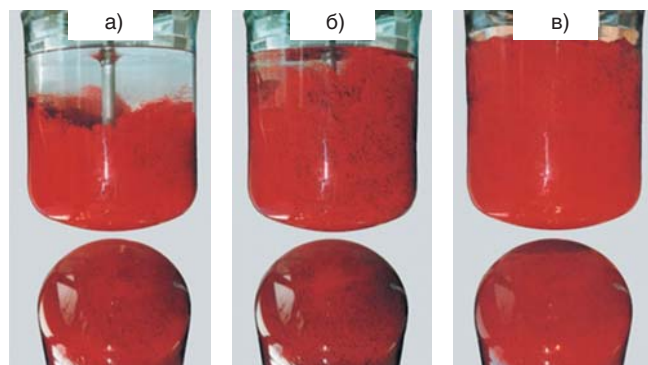


Рис. 1. Различные режимы суспендирования частиц
а – движение частиц вдоль дна; б – суспендирование в придонной области; в – распределение частиц по всей высоте аппарата

ближенным [1]) суспензии по всей высоте аппарата (рис. 1, в).

Создание равномерного распределения твердых частиц по всему объему аппарата связано с большими энергозатратами на перемешивание. Если, например, аппарат с мешалкой для создания взвеси играет роль реактора, используемого для проведения химической реакции между жидкостью и твердым телом, или предназначен для растворения кристаллов, то равномерная концентрация взвеси во всем объеме аппарата существенного значения не имеет. Но важно, чтобы все суспендируемые частицы находились во взвешенном состоянии и чтобы была создана достаточно развитая турбулентность жидкости вокруг зерен в целях уменьшения толщины ламинарного слоя на границе «жидкость – твердое» [5]. Таким образом, разработка мешалки в настоящей работе проводилась для суспендирования в придонной области, т. е. твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 1, б), что позволит сэкономить электроэнергию, потребляемую мешалкой.

Теоретическая часть

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

Для расчета перемешивающего устройства рассмотрим процесс осаждения твердой шарообразной частицы диаметром d_q , плотность которой ρ_q в жидкости с плотностью $\rho_{\text{ж}}$. Чаще всего при перемешивании жидкость–твердое $\rho_q > \rho_{\text{ж}}$. Если частицу вводят в жидкость и начальная скорость ее движения будет равна нулю, то она вначале будет двигаться ускоренно, и баланс сил,

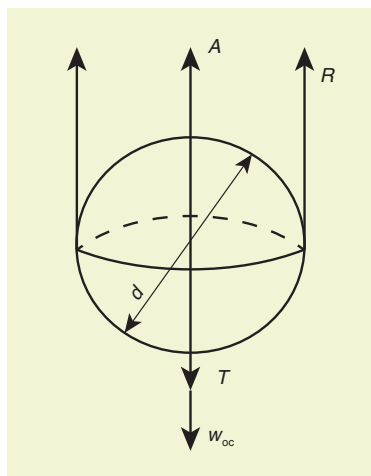


Рис. 2. Силы, действующие на частицу, осаждающуюся в гравитационном поле

действующих на нее (рис. 2), можно представить уравнением:

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

где T – сила тяжести, действующая на частицу, Н; A – выталкивающая сила Архимеда, Н; R – сила сопротивления жидкости, отнесенная к поперечному сечению частицы; J – сила инерции.

Сила тяжести T рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho_q g, \quad (2)$$

где d_q – диаметр частицы, м; ρ_q – плотность частицы, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Выталкивающая сила Архимеда A рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho_{\text{ж}} g, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Сила сопротивления R , отнесенная к поперечному сечению частицы, рассчитывается по формуле:

$$R = \varphi \frac{\pi d_q^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{ос}}^2}{2} \rho_{\text{ж}}, \quad (4)$$

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

Сила инерции J рассчитывается по формуле:

$$J = m \frac{\partial w_{\text{ос}}}{\partial t} = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho_q \frac{\partial w_{\text{ос}}}{\partial t}, \quad (5)$$

где m – масса частицы, кг.

Причем в расчете в качестве плотности жидкости принимается плотность суспензии, кг/м³:

$$\rho_c = \frac{1}{\left(\frac{1-x}{\rho_{\text{ж}}}\right) + \frac{x}{\rho_q}}, \quad (6)$$

где x – массовая концентрация твердой фазы в суспензии.

При условии постоянства скорости осаждения уравнение (1) примет вид:

$$T - A - R = 0.$$

Отсюда можно выразить величину скорости осаждения частицы в суспензии:

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4(\rho_q - \rho_c)d_q g}{3\rho_c \varphi}}. \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления φ зависит от режима осаждения частицы: ламинарный, переходный и турбулентный. Каждый режим осаждения имеет свой характер обтекания твердой частицы жидкостью. Область существования

того или иного режима осаждения определяется величиной критерия Архимеда:

$$Ar = \frac{gd_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ж}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\mu_{\text{ж}}^2}. \quad (8)$$

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

Расчет коэффициентов сопротивления подробно изложен в работе [6]. 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, то сопротивление их движению возрастает, а скорость уменьшается в соответствии с поправочными коэффициентами, которые можно найти в работе [7].

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 [1].

При соотношении диаметра емкости к диаметру мешалки более 1,5 осадок дольше всего задерживается в периферийной части днища. Наименьший радиус залегания осадка определяется по формуле [1]:

$$r = 0,189 w_0 \frac{d_{\text{м}}^2}{4} \cdot \frac{1 + \psi_1 + \psi_2}{w_{\text{ос}} H^{0,22}}. \quad (9)$$

где $w_0 = 2\pi n$ — угловая скорость мешалки, 1/с; n — частота вращения мешалки, об/с; $d_{\text{м}}$ — диаметр мешалки, м; ψ_1, ψ_2 — параметры распределения окружной скорости, определяются экспериментальным путем для мешалок нового типа или являются справочными данными для традиционных перемешивающих устройств (РД 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета»); H — глубина потока или высота заполнения аппарата, м.

Условием отсутствия осадка на дне является $r \geq D/2$ (D — диаметр аппарата). Подставляя коэффициент запаса 1,2 в формулу (4) вместо $r = 0,6D$, выразим частоту вращения мешалки n , которую примем за N_{js} :

$$N_{\text{js}} = \frac{1,2 D w_{\text{ос}} H^{0,22}}{0,189 \pi d_{\text{м}}^2 (1 + \psi_1 + \psi_2)}. \quad (10)$$

В иностранной литературе скорость вращения мешалки, необходимая для подъема осадка со дна, обозначается как N_{js} — *just suspend speed*. Многочисленные исследования на эту тему провел Цвитеринг [8], который предложил в 1958 г. формулу для расчета минимально необходимой частоты вращения:

$$N_{\text{js}} = S \nu^{0,1} d_{\text{ч}}^{0,2} \left(g \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,45} d_{\text{м}}^{-0,85} B^{0,13}, \quad (11)$$

где S — критерий Цвитеринга, определяемый опытным путем и зависящий от геометрии мешалки и соотношения размеров перемешивающего устройства и емкости; ν — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; B — массовая концентрация твердых включений.

Использование данной формулы связано с необходимостью определения коэффициента Цвитеринга S для новых форм перемешивающих устройств. На всемирной конференции по перемешиванию, проходившей в г. Тулузе в 2018 г., сообщалось [9], что данная зависимость не применима для высококонцентрированных суспензий (от 45% объемной концентрации твердого вещества), так как происходит соударение частиц при их осаждении; движение твердого вещества осуществляется в ламинарном режиме.

Зависимость (6) была модифицирована Балди в 1978 г. [10]:

$$N_{\text{js}} = \frac{1}{Z} \left(\frac{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) d_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{\text{ч}}^{1/6}}{K_n^{1/3} d_{\text{м}}^{2/3}} \cdot \frac{D}{d_{\text{м}}}. \quad (12)$$

где Z — экспериментальная константа Балди; K_n — критерий мощности мешалки.

Корреляция Балди основана на гипотезе о том, что твердые частицы взвешены вследствие турбулентных вихрей, которые имеют величину порядка диаметра частицы. Теоретически эта методика расчета более обоснована, однако у нее есть и недостатки: она включает в себя экспериментальную константу Z , которая является функцией геометрии. В этом уравнении не учитываются концентрация твердых веществ и вязкость жидкости. Поэтому методика Балди не нашла столь широкого распространения, как формула Цвитеринга.

В 2014 г. в статье Айранчи и Креста [11] теория Цвитеринга и Балди была дополнена. Для расчета критической частоты вращения мешалки N_{js} была разработана новая формула:

$$N_{\text{js}} = A \left(\frac{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{\text{ч}}^{1/6} x^n}{K_n^{1/3} d_{\text{м}}^{2/3}} \cdot \frac{D}{d_{\text{м}}}. \quad (13)$$

где A — константа, зависящая от геометрии мешалки и свойств твердых частиц.

Константу A можно рассчитать через коэффициент Цвитеринга:

$$A = S \frac{d_{\text{ч}}^{1/30} K_n^{1/3} \nu^{0,1}}{d_{\text{м}}^{11/60}} \cdot \frac{d_{\text{м}}}{D} \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-0,05} \quad (14)$$

Высота установки рабочего органа перемешивающего устройства и его геометрические особенности влияют на создание циркуляционных контуров, как представлено на рис. 3.

Исследователями Канадского технического университета было доказано, что применение мешалок с восходящим потоком, а также двойного циркуляционного контура способствует образованию залежей под мешалкой, так как образуется застойная зона [12]. На рис. 4 пред-

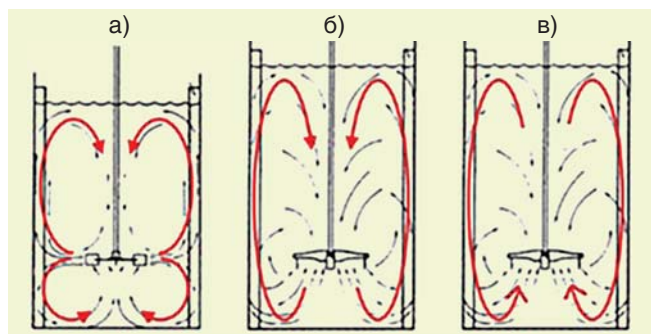


Рис. 3. Создание циркуляционных контуров различных мешалок в зависимости от формы и высоты установки над дном

а — двойной контур; б — одинарный контур с нисходящим потоком; в — одинарный контур с восходящим потоком

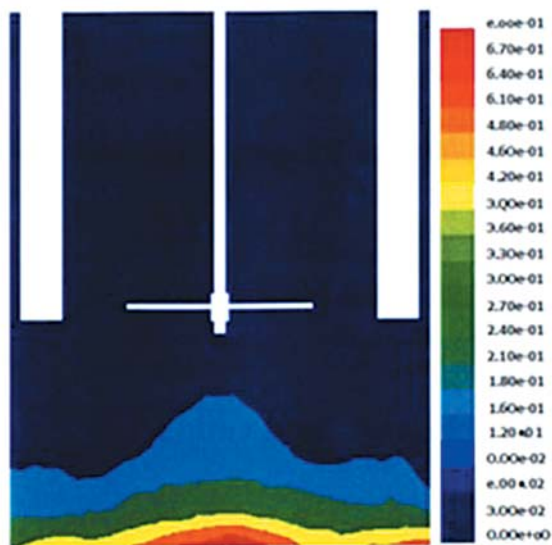


Рис. 4. Результаты CFD-моделирования перемешивания суспензии при помощи мешалки Pitch Blade Turbine (с наклонными лопастями), установленной на высоте, равной половине диаметра емкости (частота вращения 250 об/мин, 10% суспензии твердых частиц диаметром 210 мкм)

ставлены результаты математического моделирования, наглядно демонстрирующего образование зоны пониженных скоростей.

В настоящей работе для проведения суспендирования пульпы известняка выбрана мешалка разработанной авторами конструкции [3], которая была усовершенствована: лопасти мешалки наклонены в сторону поверхности жидкости для создания осевого потока. Внутри мешалки имеется отверстие. Геометрия мешалки представлена на рис. 5.

Конструкция перемешивающего устройства такова, что в центральной части аппарата создается восходящий поток, который засасывает твердые включения, т. е. работает как своеобразный «пылесос», устраняя недостаток обычных перемешивающих устройств (рис. 3). Визуализация потока в динамике была проведена с помощью шариков силикагеля, плотность которого близка к плотности воды. Модель мешалки диаметром 300 мм вращалась с частотой 120 об/мин. Поведение частиц в динамике показано на рис. 6.

Еще одним немаловажным фактором при проведении расчета перемешивающего устрой-



Рис. 5. Внешний вид модели мешалки диаметром 300 мм

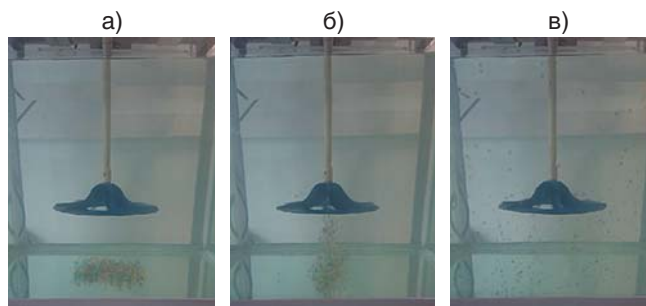


Рис. 6. Структура потока в динамике

а — твердые частицы находятся под мешалкой спустя 3 секунды работы; б — твердые частицы поднимаются вверх и засасываются внутрь мешалки спустя 6 секунд; в — частицы распределены преимущественно в нижней части перемешиваемого объема спустя 9 секунд с начала работы

ства для промышленного аппарата является правильное масштабирование результатов экспериментов. Группа чешских авторов [13] предложила модифицированное число Фруда:

$$Fr'' = \frac{N_{js}^2 d_m \rho_{\text{ж}}}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}. \quad (15)$$

Данное соотношение характеризует отношение динамического напора, создаваемого мешалкой, к выталкивающей силе, действующей на частицу. Отметим, что в числителе формулы (15) использован диаметр мешалки, а в знаменателе следовало бы использовать диаметр частиц, т. е. формулу (15), по нашему мнению, более логично представить в форме:

$$Fr_p = \frac{N_{js}^2 d_m^2 \rho_{\text{ж}}}{g d_{\text{ч}}^2 \Delta \rho}. \quad (15a)$$

Экспериментальная часть

Исследования в лабораторном аппарате

Эксперименты по определению минимально необходимой скорости вращения мешалки для суспендирования проводились в лабораторном аппарате. В качестве материала модельной среды использован карбонат кальция (размеры частиц — от 14 до 42 мкм, форма частиц — хлопья, плотность частиц — 2600 кг/м³).

Эксперименты в лабораторном аппарате проведены с соблюдением геометрического подобия отношения диаметров мешалки и аппарата. Основные параметры сравнения промышленного и лабораторного аппаратов представлены в табл. 1. Схема лабораторной установки приведена на рис. 7.

Ход проведения эксперимента:

1. В емкость, заполненную водой, добавляется измеренная на весах необходимая масса модельных частиц (погрешность измерения $\pm 0,01$ г).
2. Необходимо дождаться полного осаждения твердых частиц.
3. Включается мешалка на частоту вращения 200 об/мин.
4. Необходимо дождаться установившегося режима перемешивания жидкости (2 мин).

Таблица 1

Параметр	Промышленный аппарат	Лабораторный аппарат
D , мм	4500	180
d_m , мм	2000	80
D/d_m	2,5	2,25
$H_{\text{ж}}$, мм	4500	175
H/D	1	0,97

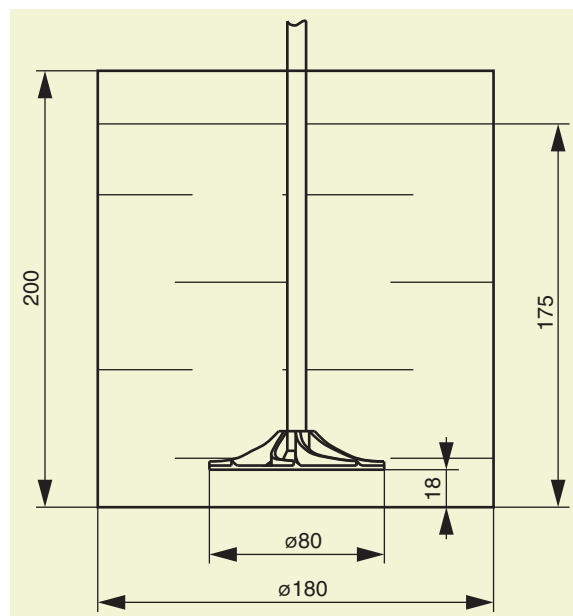


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

5. Частота вращения увеличивается с шагом 10–15 об/мин до того момента, когда все твердые частицы будут находиться во взвешенном состоянии (максимальное время нахождения частицы в осевшем положении — 1–2 секунды), при этом после каждого увеличения частоты вращения мешалки необходимо дождаться установления режима перемешивания.

6. Значение минимально необходимой частоты суспендирования записывается в журнал эксперимента.

7. Выключается мешалка, эксперимент повторяется с той же концентрацией твердой фазы еще 2 раза.

Результаты проведения ряда экспериментов по определению критерия Цвитеринга и расчета по двум методикам приведены в табл. 2. Графики зависимости критической частоты вращения мешалки от концентрации твердой фазы в суспензии представлены на рис. 8.

Характеристика мощности, потребляемой мешалками, рассчитывалась по формуле, подробно описанной в статье [14]. Критерий мощности K_n для конической мешалки был установлен путем измерения крутящего момента при помощи датчика М40 (производства ООО «Тилком», Минск), точность которого составляет $\pm 0,1$ Н·м. Частота вращения контролировалась при помощи бесконтактного тахометра.

Проведение испытаний в промышленном аппарате

Для увеличения скорости реакции нейтрализации серной кислоты известковым молоком и достижения требуемого уровня pH необходимым

Твердая фаза	ρ , кг/м ³	δ , мм	Концентрация, масс. %	n , об/мин	$n_{\text{ср}}$, об/мин	Критерий $S_{\text{ср}}$ по Цвитерингу	Критерий $A_{\text{ср}}$ по Креста
Ионообменная смола	1370	0,677	2,5	315 / 319 / 314	316	9,84	22,2
			5	336 / 341 / 337	338		
			10	381 / 378 / 379	379		
			15	423 / 425 / 419	422		
Микрокальцит	2600	0,042	2,5	419 / 422 / 421	421	11,64	26,3
			5	448 / 452 / 455	452		
			10	486 / 495 / 489	490		
			15	514 / 518 / 522	518		

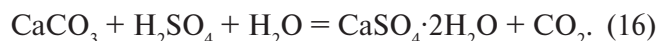
условием является отсутствие залежей на дне аппарата, т. е. максимальное количество частиц известняка должно вступить в реакцию с серной кислотой.

В первую очередь необходимо определить диаметр частиц твердых включений для последующего расчета скорости их осаждения. Были взяты пробы известкового молока и глиняной пульпы. Образцы данных суспензий были изучены под электронным микроскопом. Сделанные фотографии (рис. 9, 10) были обработаны с це-

лью определения диаметра Заутера и максимального диаметра твердых включений.

После обработки фотографий под микроскопом (подробно метод описан в работе [14]) были получены следующие результаты. Для известкового молока: диаметр Заутера – 24 мкм, максимальный диаметр – 65 мкм. Для глиняной пульпы: диаметр Заутера – 120 мкм, максимальный диаметр – 255 мкм.

Расчет среднего заутеровского диаметра проведен по методике из работы [14]. В глиняной пульпе были обнаружены твердые включения, диаметр которых в несколько раз больше максимального диаметра частиц в известковом молоке. Это объясняется тем, что в процессе нейтрализации на поверхности известняка происходит реакция:



В результате этого каждое зерно покрывается гипсом и укрупняется в размере, так как вес известняка (CaCO_3) составляет 100 г/моль, а вес двуводного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – 172 г/моль.

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

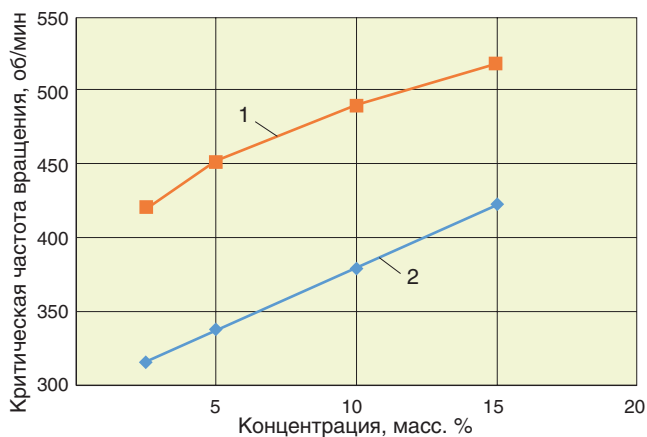


Рис. 8. Зависимость критической частоты вращения мешалки от концентрации твердой фазы в суспензии 1 – смола; 2 – микрокальцит

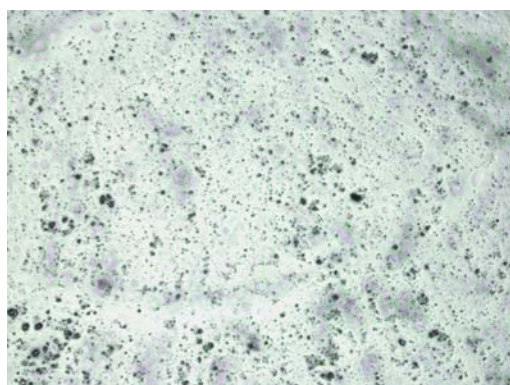


Рис. 9. Твердые включения известкового молока

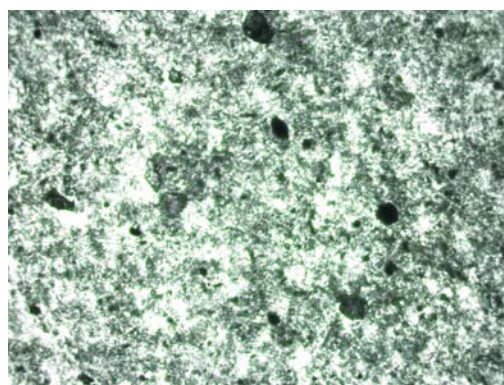


Рис. 10. Твердые включения глиняной пульпы

установке мешалки было принято решение обеспечить подачу серной кислоты в зону максимальных турбулентных пульсаций. Кроме того, геометрия новой мешалки содержит 8 лопастей. По сравнению с традиционными конструкциями площадь обмена импульсом существенно выше, за один оборот перемешивающего устройства для нейтрализации мешалкой подводится 8 новых доз известкового молока.

При расчете скорости вращения перемешивающего устройства наличие редких твердых включений большого диаметра в гипсовой пульпе не учитывали, так как, согласно гистограмме плотности распределения, они составляют очень незначительную часть выборки (рис. 11).

Согласно требованиям, указанным в технической документации ОАО «Святогор», тонкость помола известняка должна составлять не менее 80% частиц диаметром менее 74 мкм. Таким образом, существует возможность наличия в суспензии частиц известия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с диаметром более 65 мкм. Для достижения максимальной эффективности реакции нейтрализации следует учитывать и их наличие.

Для расчета перемешивающего устройства примем диаметр частиц пульпы $d_q = 65$ мкм. Осаждение происходит в турбулентном режиме.

Процесс нейтрализации серной кислоты известковым молоком осуществляется в шести аппаратах с мешалками, которые работают в периодическом режиме с продолжительностью цикла 60 минут и четырьмя временными отрезками — операциями нейтрализации:

операция 1 — с 1-й по 10-ю минуту — заполнение аппарата известковым молоком;

операция 2 — с 11-й по 30-ю минуту — дозированная подача серной кислоты;

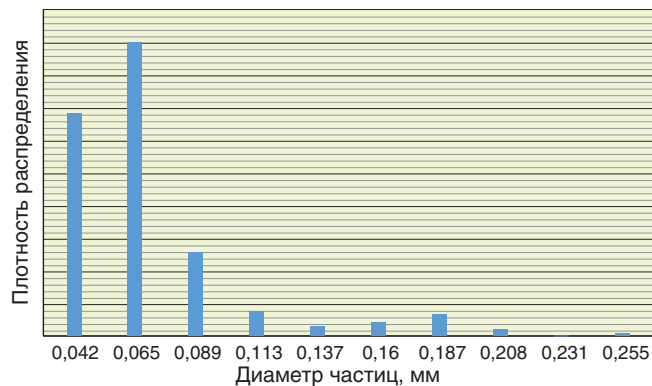


Рис. 11. Гистограмма плотности распределения диаметра частиц гипсовой пульпы

операция 3 — с 31-й по 50-ю минуту — протекание реакции нейтрализации, созревание гипса;

операция 4 — с 51-й по 60-ю минуту — откачка гипсовой пульпы из аппарата.

В промышленном аппарате до модернизации были установлены лопастные мешалки. На дне аппарата наблюдались отложения известия, не вступившей в реакцию (рис. 12, а), что подтверждается исследованиями, проведенными авторами [11]. По мере работы залежи образуются все выше, доходят до мешалки и в конечном счете препятствуют вращению, что приводит к поломке вала.

В процессе модернизации реактора для нейтрализации серной кислоты была установлена коническая мешалка с мотор-редуктором Sew Eurodrive 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 частоты вращения мешалки.

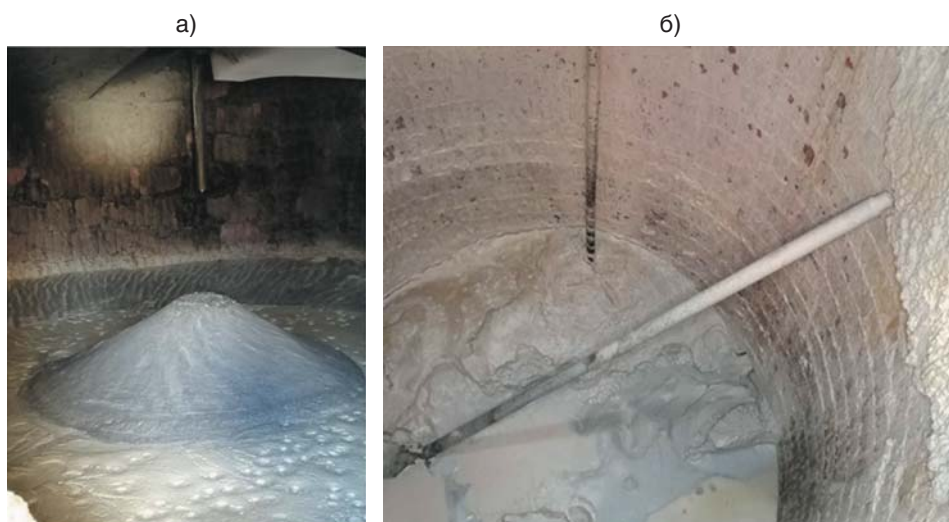


Рис. 12. Дно аппарата с отложениями при работе лопастной мешалки
а — после одного цикла нейтрализации; б — после одной недели работы при 24 циклах в день

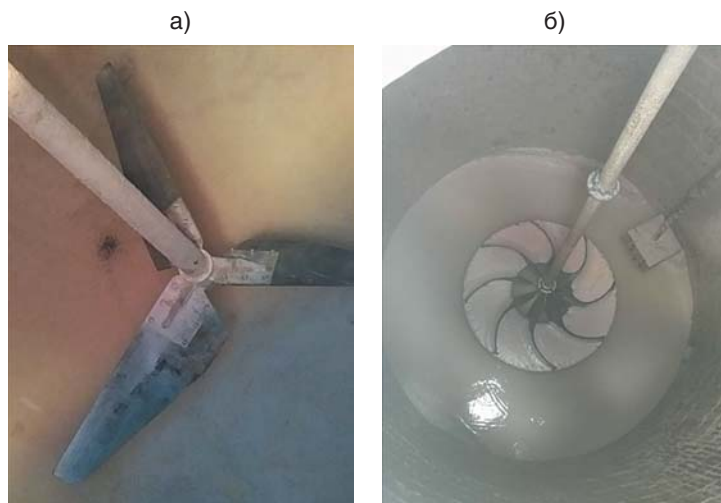


Рис. 13. Внешний вид аппарата с мешалкой до модернизации (а) и после (б)

В реакторе на высоте 3 м от дна установлен рН-датчик, 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 новой мешалки и мешалки до модернизации аппарата представлены на рис. 13. Сравнительные характеристики параметров перемешивающих устройств приведены в табл. 3.

При запуске мешалки с частотой вращения 43 об/мин был подтвержден расчет, проведенный в рамках лабораторных исследований. При внедрении нового перемешивающего устройства сокращено время проведения реакции с 60 до 30 минут. Кислота поступает в емкость и попадает в зону действия мешалки, нейтрализация проходит за несколько секунд. В процессе работы было принято решение снизить частоту вращения до 30 об/мин, что существенно сократит потребляемую мощность.

Таблица 3

Параметр	Мешалка до модернизации	Новая мешалка
Тип мешалки	Трехлопастная	Коническая запатентованной конструкции [3]
Частота вращения, об/мин	60	43
Диаметр мешалки, мм	1400	2000
Высота установки над дном, мм	1600	500
Мощность привода, кВт	7,5	5,5

Выводы

Разработанная методика расчета конической мешалки предназначена для процессов суспендирования в системе «жидкость – твердое». В ходе лабораторных исследований определен критерий Айранчи–Креста, позволяющий определить требуемую частоту вращения новой мешалки, а также рассчитать потребляемую мощность. Доказано, что разработанная мешалка конической формы наилучшим образом подходит для суспендирования твердых частиц в жидкости: при более эффективной работе снижается потребляемая мощность. Положительный результат был получен благодаря следующему:

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

новая мешалка по сравнению с турбинной скруглена, имеет обтекаемую форму, что влияет на снижение энергопотребления. В результате удалось снизить потребляемую мощность по сравнению с существующей мешалкой в 1,8 раза;

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;

поскольку 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 приводит к удешевлению и упрощению оборудования, а также к более низким затратам на периодическое проведение технического обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах. — Л.: Химия, 1984. 336 с.
- Прокудина Е. В., Тропников Д. Л., Каратаева А. В., Шукшина О. В. Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 340–345.

3. Пат. 2683078, РФ. МПК B01F 7/18, B01F 7/26. Перемешивающее устройство / Абиев Р. Ш., Григорьева А. Н. // Изобретения. Полезные модели. 2019. № 9.
4. Lin F. Y., Shao S. EKATO handbook of mixing technology. Schopfheim: Wear. 1991. V. 143. P. 231–240.
5. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Перевод с польского под редакцией Щупляка Л. Е. — Л.: Химия, 1975. 384 с.
6. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. — М.: Химия, 1987. 496 с.
7. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. — М.: Химия, 2002. 400 с.
8. Zwietering T. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators // Chemical Engineering Science. 1958. V. 8. Is. 3–4. P. 244–253.
9. Nur Syafiqah Janurin, Choe Earn Choong, Zauyah Zamzam, Shaliza Ibrahim. 16th European Conference on Mixing — Mixing 16 «Suspension Characteristics of Fine Particles at High Loadings in Flat and Dished Base Tanks», Toulouse, France, 2016.
10. Baldi G., Conti R., Alaria E. Complete suspension of particles in mechanically agitated vessels // Chemical Engineering Science. 1978. № 33. P. 21–25.
11. Ayranci I., Kresta S. M. Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks // Chemical Engineering Research and Design. 2014. № 92. P. 413–422.
12. Rieger Dtl. Suspension of solid particles // Chemical Engineering Science. 1994. № 49. P. 2219–2227.
13. 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.
14. 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.

REFERENCES

1. Braginskii L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh* [Mixing in liquid environment. Leningrad, Khimiia Publ., 1984, 336 p.].
2. Prokudina E. V., Tropnikov D. L., Karataeva A. V., Shukshina O. V. [Neutralization of technical sulfuric acid with natural limestone at Sviatogor JSC]. *Gornyi Informatsionno-Analiticheskii Biulleten' (Scientific and Technical Journal)*, 2016, no. 8, pp. 340–345. (In Russian).
3. Abiev R. Sh., Grigor'eva A. N. [Pat. 2683078, RF. MPC B01F 7/18, B01F 7/26. Mixing device]. *Izobretenia. Poleznye Modeli*, 2019, no. 9. (In Russian).
4. Lin F. Y., Shao S. EKATO handbook of mixing technology. Schopfheim: Wear, 1991, v. 143, pp. 231–240.
5. Strenk F. *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Mixing and apparatus with mixers. Translated from Polish under the editorship of Shchupliak L. E. Leningrad, Khimiia Publ., 1975, 384 p.].
6. Planovskii A. N., Nikolaev P. I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi i neftekhimicheskoi tekhnologii* [Processes and apparatus of chemical and petroleum technology. Moscow, Khimiia Publ., 1987, 496 p.].
7. Dytnerskii Iu. I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii: uchebnik dlia vuzov* [Processes and apparatus of chemical technology: a textbook for universities. Moscow, Khimiia Publ., 2002, 400 p.].
8. Zwietering T. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, 1958, v. 8, is. 3–4, pp. 244–253.
9. Nur Syafiqah Janurin, Choe Earn Choong, Zauyah Zamzam, Shaliza Ibrahim. 16th European Conference on Mixing — Mixing 16 «Suspension Characteristics of Fine Particles at High Loadings in Flat and Dished Base Tanks», Toulouse, France, 2016.
10. Baldi G., Conti R., Alaria E. Complete suspension of particles in mechanically agitated vessels. *Chemical Engineering Science*, 1978, no. 33, pp. 21–25.
11. Ayranci I., Kresta S. M. Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, no. 92, pp. 413–422.
12. Rieger Dtl. Suspension of solid particles. *Chemical Engineering Science*, 1994, no. 49, pp. 2219–2227.
13. Grigor'eva A. N., Abiev R. Sh. [Influence of the geometry of the mixing device on the diameter of air bubbles during mixing in the gas-liquid system]. *Khimicheskaja Promyshlennost' Segodnia*, 2019, no. 5, pp. 18–22. (In Russian).
14. Grigor'eva A. N., Abiev R. Sh. [Comparative analysis of the influence of the geometric shape of the impellers of mixing devices on the suspending efficiency in the liquid — solid system]. *Izvestiia SPbGTI (TU)*, 2018, no. 45, pp. 94–97. (In Russian).