

# Исследование процесса суспендирования с использованием конической мешалки производства АО «Астерион» на примере процесса нейтрализации серной кислоты на предприятии ОАО «Святогор»

**А.Н. Григорьева** — генеральный директор AO «Астерион» **Р.Ш. Абиев** — д.т.н., профессор, зав. кафедрой ОХБА СПбГТИ (ТУ)

олее 50 % аппаратов с мешалками, применяемых в промышленности, используются 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, гетерогенной химической реакции и т.д. Одним из примеров перемешивания в системе жидкость-твердое является реализованная в ОАО «Святогор» технология нейтрализации серной кислоты, которая основана на том, что готовое известковое молоко (плотность 1,08-1,10 г/см3, рН 7,6-7,7) и техническая серная кислота (плотность 1,82-1,83 г/см3, концентрация 94 % масс.) одновременно 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

Большинство аппаратов с мешалками, применяемые в промышленности, используются для перемешивания жидких сред, содержащих твердые частицы. Одним из примеров перемешивания в системе жидкость — твердое является реализованная на предприятиях УГМК холдинга технология нейтрализации серной кислоты.

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

Путем проведения промышленной апробации мешалки доказано, что разработанная нами мешалка конической формы наилучшим образом подходит для суспендирования твердых частиц в жидкости: при более эффективной работе наблюдается снижение потребляемой мощности.

**Ключевые слова:** мешалка, перемешивание суспензии, известковое молоко, нейтрализация серной кислоты.

анализ процесса суспендирования с использованием конической (другое название — гиперболической) мешалки нового типа, производства АО «Астерион», а также подбор опти-

мальной геометрии энергосберегающей мешалки [3] на примере процесса нейтрализации известковым молоком раствора серной кислоты на предприятии OAO «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 случае, когда аксиальная составляющая скорости потока жидкости (W<sub>0</sub>) больше или равна скорости осаждения твердой фазы (W<sub>ос</sub>). Аксиальная составляющая скорости пропорциональна частоте вращения мешалки. При этом концентрация твердого вещества будет уменьшаться в нижней и возрастать в верхней частях аппарата. 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, вверх, 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.

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 на 2 секунды (рис. 1a).
- Суспендирование в придонной области, когда твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 16).
- 3. Создание равномерной концентрации (причем равномерное распределение является приближенным [1]) суспензии по всей высоте аппарата (рис. 1в).

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, равномерная концентрация взвеси во всем объёме аппарата существенного значения не имеет, но важно, чтобы все суспендируемые частицы находились во взвешенном состоянии и чтобы была создана достаточно развитая турбулентность

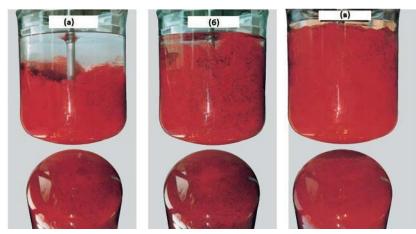


Рис. 1. Различные режимы суспендирования частиц

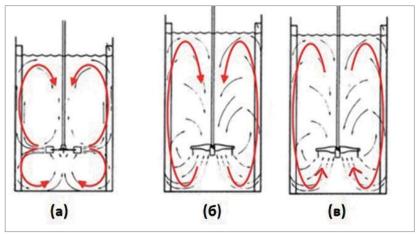


Рис. 2. Создание циркуляционных контуров различных мешалок в зависимости от формы и высоты установки над дном: а — двойной циркуляционный контур; б — одинарный циркуляционный контур с нисходящим потоком; в — одинарный циркуляционный контур с восходящим потоком

жидкости вокруг зерен в целях уменьшения толщины ламинарного слоя на границе жидкость—твердое [5]. Таким образом, разработка мешалки в настоящей работе будет проводиться для суспендирования в придонной области, когда твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 1б), что позволит сэкономить электроэнергию, потребляемую мешалкой.

Высота установки рабочего органа перемешивающего устройства и его геометрические особенности влияют на создание циркуляционных контуров, как представлено на рисунке 2.

Исследователями канадского технического университета было доказано, что применение мешалок с восходящим потоком, а также использование двойного циркуляционного контура способствует образованию залежей под мешалкой, т.к. образуется застойная зона [6]. На рисунке 3 представлены результаты математического моделирования, наглядно демонстрирующего образование зоны пониженных скоростей.

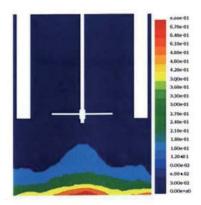


Рис. 3. Результаты CFD моделирования перемешивания суспензии при помощи мешалки Pitch Blade Turbine (мешалка с наклонными лопастями) при частоте вращения 250 об/мин, 10 % суспензии твердых частиц с диаметром dч = 210 мкр, установленной на высоте, равной половине диаметра емкости

Данные из литературных источников подтверждены на практике: на рисунке 4 (с. 114) представлена фотография отложений, которые образовывались в реакторе предприятия ОАО «Святогор» при работе лопастных мешалок. •

## ТЕХНОЛОГИИ

Таким образом, в настоящей работе для проведения суспендирования пульпы известняка авторами выбрана мешалка собственной конструкции [3].

Для проведения реакции нейтрализации необходимо, чтобы максимально большее количество частиц известняка вступило в реакцию с серной кислотой, т.е. залежи на дне аппарата должны отсутствовать. Для правильного расчета частоты вращения мешалки в первую очередь необходимо определить диаметр частиц твердых включений для последующего расчета скорости их осаждения. Скорость потока, создаваемая мешалкой, должна превышать скорость осаждения частиц. Таким образом, для начала работы были взяты пробы известкового молока и глиняной пульпы. Образцы данных суспензий были изучены под электронным микроскопом, и сделанные фотографии (рис. 6 и 7) были обработаны с целью определения диаметра Заутера и максимального диаметра твердых включений.

После обработки фото под микроскопом (подробно метод описан в [7]) были получены следующие результаты.

# Для известкового молока:

- диаметр Заутера 6,2 мкм;
- максимальный диаметр 65 мкм.

# Для глиняной пульпы:

- диаметр Заутера 31 мкм;
- максимальный диаметр 255 мкм.

Расчет среднего заутеровского диаметра проведен по методике из [8]. 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:

 $CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2$ 



Рис. 4. Залежи известняка при работе лопастных мешалок



Рис. 5. Внешний вид нового перемешивающего устройства

В результате чего каждое зерно покрывается гипсом и укрупняется в размере, так как вес известняка ( $CaCO_3$ ) = 100 г/моль, а вес двуводного гипса ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) = 172 г/моль.

Сохранение крупных частиц негативно сказывается на скорости нейтрализации, т.к. 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, геометрия новой мешалки содержит 8 лопастей, по сравнению с традиционными конструкциями площадь обмена импульсом существенно выше, за один оборот перемешивающего устройства подводится 8 новых доз известкового молока.

При расчете скорости вращения перемешивающего устройства наличие редких твердых включений большого диаметра в гипсовой пульпе не учитывали, т.к. согласно гистограмме плотности распределения, они составляют очень незначительную часть выборки (рис. 8).

Согласно техническим требованиям, указанным в технической документации ОАО «Святогор», тонкость помола известняка должна составлять не менее 80 % класса -74 мкм. Таким образом, возможно наличие в суспензии частиц извести Са(ОН)<sub>2</sub> с диаметром больше 65 мкм. Для достижения максимальной эффективности реакции нейтрализации нужно учитывать и их наличие.

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

- 1 операция (с 1 по 10 минуты) заполнение аппарата известковым молоком;
- 2 операция (с 11 по 30 минуты) дозированная подача серной кислоты:
- 3 операция (с 31 по 50 минуты) протекание реакции нейтрализации, созревание гипса;
- 4 операция (с 51 по 60 минуты) раскачивание гипсовой пульпы из аппарата.

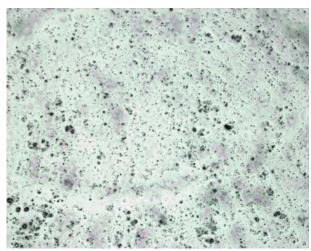


Рис. 6. Фотоизображение твердых включений известкового молока

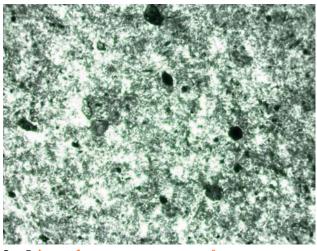


Рис. 7. Фотоизображение твердых включений глиняной пульпы

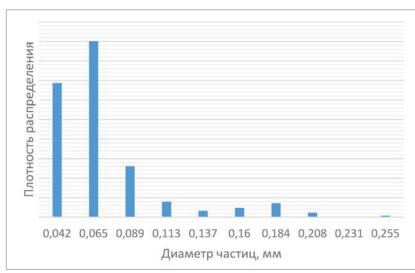


Рис. 8. Гистограмма плотности распределения диаметра частиц гипсовой пульпы

В промышленном аппарате,

наблюдались отложения извести,

не вступившей в реакцию (рис. 9).

ся все выше, доходят до мешалки

щению, что ведет в поломке вала.

до модернизации, были установлены

лопастные мешалки. На дне аппарата

По мере работы залежи образовывают-

и в конечном итоге препятствуют вра-

В процессе модернизации реактора

для нейтрализации серной кислоты была

установлена коническая мешалка со сле-

дующими характеристиками: мощность двигателя — 5,5 кВт; частота враще-

ния — 43 об/мин; диаметр мешалки —

2 м; длина вала — 5,9 м. Мотор редуктор

вателем для возможности варьирования частоты вращения мешалки. В реакторе, на высоте 3 метра от дна, которого выволен датчик рН, 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. На рисунке 10а представлена новая мешалка, а мешалка до модерни-

Сравнительные характеристики параметров перемешивающих устройств представлены в таблице 1 (с. 116).

зации аппарата — на рисунке 10б.



Рис. 9. Фотография дна аппарата с отложениями при работе лопастной мешалки

Общепризнанным недостатком вертикальных перемешивающих устройств является наличие в конструкции длинного вала для крепления рабочего колеса мешалки, в случае несбалансированной работы которого вибрации будут передаваться на подшипники мотор редуктора и в конце концов приведут к поломке привода. Рассмотрим подробнее силы, действующие на рабочее колесо традиционной лопастной мешалки (рис. 11а, с. 116) и конической мешалки (рис. 11б, с. 116).

Коническое, сплошное рабочее колесо создает постоянный однородный радиальный поток без периодических колебаний. Аксиальные силы по срав-





Рис. 10. Внешний вид аппарата с мешалкой: а) новый тип мешалки; б) аппарат до модернизации

## ТЕХНОЛОГИИ

Параметры	Мешалка трехлопастная (до модернизации)	Мешалка коническая запатентованной конструкции (после модернизации)
Частота вращения, об/мин	60	43
Диаметр мешалки, мм	1400	2000
Высота установки над дном, мм	1600	500
Установленная мощность, кВт	7,5	5,5
Время проведения реакции, мин	60	30

Табл. 1. Сравнительные характеристики перемешивающих устройств

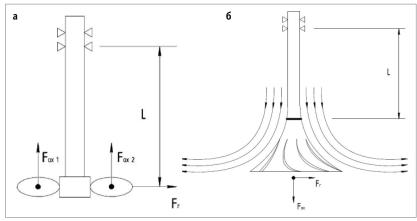


Рис. 11. Силы, действующие на рабочее колесо традиционной лопастной мешалки (а) и конической мешалки (б)





Рис. 12. Внешний вид аппарата с мешалкой: а) аппарат до модернизации; б) новый тип мешалки без промежуточных подшипниковых опор

нению с лопастной мешалкой действуют не вверх, а вниз [9]. Таким образом, нагрузка на подшипники двигателя и опору мешалки снижается. Это ведет к снижению вибрации в месте установки мешалки и, как следствие, к более продолжительному сроку службы двигателя, отсутствию необходимости установки промежуточных подшипниковых узлов, снижению веса и материалоемкости опорных мостиков для монтажа мешалки. Фотографии ранее

установленной мешалки с промежуточной опорой и новой мешалки производства АО «Астерион», которая не требует дополнительного усиления подшипниковой опоры, показаны на рисунках 12а и 12б.

# Выводы

В ходе проделанной 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 исходя из:

- поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в нуль, источником возникновения подъёмной 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;
- новая мешалка имеет обтекаемую форму, что положительно сказывается на энергопотреблении. 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;
- 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. ◆



- 1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах, Л.: Химия, 1984. 2. Прокудина Е.В., Тропников Д.Л., Каратаева А.В., Шукшина О.В. «Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор». Горный информационно-аналитический бюллете (научно-технический журнал), №8, 2016. С. 340–345.
  - 3. Абиев Р.Ш., Григорьева А.Н.
  - л. омсе т.ш., григорьева А.Н.
    «Перемешмвающее устройство». Россия,
    Патент 2683078, 06.06.2018.
     4. Lin F. Y., Shao S. EKATO Handbook of Mixing
    Technology, Schopfheim: Wear. Vol. 143. 1991.
    P. 231–240.

- Тесhnology, Schopfheim: Wear. Vol. 143. 1991. P. 231—240.

  5. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Перевод с польского под редакцией к.т.н Л. Е. Щупляка.

  6. Ayranci, Kresta S.M., «Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks», chem. Eng. Res., № 92, 2014. Рр. 413—422.

  7. А.Н. Григорьева , Р.Ш. Абиев, «Сравнительный анализ влияния геометрической формы рабочих колес перемешивающих устройств на эффективность суспендирования в системе жидкость—твердое». Известия СПбТИ(ТУ). № 45, 2018. С. 94—97.

  8. Григорьева А.Н., Абиев Р.Ш. «Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ—жидкость». Химическая промышленность сегодня, № 5, 2019. С. 18—22.
- химическая промышленность сегодня, № 5, 2019. С. 18—22. 9. Hoefken M. «About the Design of Mixing Systems for Anaerobic and Anoxic Basins for Large Wastewater Treatment Plants». 10. Холланд Ф., Чапман Ф. Химические
- реакторы и смесители для жидкофазных процессов., М.: Химия, 1974, 208 с.





Компания «Элма» и производственное подразделение АО «Астерион» являются предприятием полного цикла на рынке химически стойкого насосного и перемешивающего оборудования из пластика для применения с агрессивными средами. В качестве реализации стратегии по организации российского производства подобного оборудования АО «Астерион» разрабатывает, производит и внедряет инновационные, энергосберегающие и надежные перемешивающие устройства, которые особенно востребованы в сфере очистки воды, перемешивания в технологических установках химических и гидрометаллургических предприятий.

# Наши преимущества

# Предприятие полного цикла

Разработка и изготовление под ключ технологичных решений по индивидуальным требованиям заказчика, сервисное обслуживание и обучение

# Математическое моделирование перемешивания

Технический отдел проводит расчет скоростей потока методами численного моделирования для прогнозирования эффективности перемешивания исходя из конкретных параметров резервуаров и перемешиваемой среды

# Собственный лабораторный комплекс

Проверка мощности, вибрации, уровня шума и критической частоты вращения перемешивающих устройств на соответствие требованиям заказчика

# Высокие стандарты качества

Пройдена сертификация по стандарту ISO 9001. Внедрено бережливое экологичное производство. 100% контроль качества перед отгрузкой



Инновационное решение для поддержания во взвешенном состоянии и гомогенизации твердых частиц в аппаратах больших объёмов