

К ВЫБОРУ ТИПА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ МЕШАЛКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ФЛОКУЛЯНТОВ В ВОДЕ

Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.

SELECTING THE TYPE AND ROTATION SPEED OF A MIXER FOR EFFICIENT MIXING OF FLOCCULANTS IN WATER

Grigoreva A. N., Abiev R. Sh.

Аннотация

Введение. Рассматривается физико-химический процесс растворения частиц твердого порошка высокомолекулярного флокулянта в воде под действием центробежного поля, возникающего в результате работы перемешивающих устройств. **Методы.** Описываются аппаратура и методика проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях, дается схема экспериментальной установки приготовления концентрированного раствора флокулянта, состоящей из перемешивающего устройства и цилиндрической стеклянной емкости. **Результаты.** Показано, что выбор оптимальной частоты вращения перемешивающего устройства связан с величиной напряжений турбулентного трения, создаваемых рабочим колесом мешалки. Разработана и проверена на практике методика расчета допустимой частоты вращения перемешивающего устройства, в основе которой лежит полуэмпирическая модель турбулентности Прандтля. Показаны результаты экспериментальных исследований по приготовлению концентрированных растворов высокомолекулярного флокулянта GreenLife K40 катионного действия с использованием различных типов рабочих колес перемешивающего устройства. **Заключение.** Экспериментальным способом продемонстрирована эффективность нового рабочего колеса конической формы по сравнению с традиционными лопастными и турбинными рабочими колесами за счет меньших создаваемых турбулентных вихрей, разрывающих полимерные связи в концентрированном растворе флокулянта. Мешалка с коническим рабочим колесом позволяет готовить раствор флокулянта на 30 % быстрее за счет возможности перемешивания на более высокой частоте вращения при более низком энергопотреблении.

Ключевые слова: перемешивающие устройства, флокулянт, полимеры, турбулентные напряжения.

Abstract

Introduction. The paper addresses the physico-chemical process of dissolving the particles of solid high molecular weight powder flocculant in water under the action of a centrifugal field generated as a result of mixer operation. **Methods.** The authors describe equipment and methods to conduct experimental research in laboratory conditions and present an experimental setup used to prepare a concentrated flocculant solution, consisting of a mixer and a cylindrical glass container. **Results.** It is shown that the selection of the optimal mixer rotation speed is associated with the magnitude of turbulent friction stresses generated by the mixer impeller. A method to calculate the permissible rotation speed of a mixer based on a semi-empirical Prandtl turbulence model has been developed and tested. The paper presents the results of experimental studies on the preparation of concentrated solutions of high molecular weight cationic flocculant GreenLife K40 using various types of mixer impellers. **Conclusion.** The authors have experimentally demonstrated the efficiency of a new conical impeller compared to standard blade and turbine impellers due to smaller turbulent eddies breaking polymer bonds in a concentrated flocculant solution. A mixer with a conical impeller makes it possible to prepare a flocculant solution 30% faster due to the possibility of mixing at a higher speed with lower energy consumption.

Keywords: mixers, flocculant, polymers, turbulent stresses.

Введение

Коагулянты и флокулянты с давних пор применялись при подготовке воды для питьевых целей, очистке сточных вод, сгущении шлама горно-обогатительных предприятий, при углеобогащении, добыче ценных минералов. Высокомолекулярные вещества, используемые в технологии

химической очистки воды, принято называть флокулянтами, а процесс образования хлопьев при использовании этих веществ — флокуляцией [3].

К основным технологическим проблемам при флокуляции относятся необходимость выбора наиболее эффективного флокулянта и создание

оптимального технологического режима приготовления его растворов и их последующего применения [4]. Действие полимеров зависит от следующих факторов:

- природы флокулянта;
- молекулярной массы;
- концентрации дисперсной фазы;
- условий внесения и приготовления полимера.

подавляющее большинство флокулянтов поставляется в твердой форме. Это обусловлено экономией затрат при транспортировке, более легкими способами складирования и хранения сухих веществ [12]. Различные аспекты очистки воды с применением неорганических коагулянтов и флокулянтов многие годы изучались в НИИ ВОДГЕО, НИИКВ и ОВ, ИОТТ, институтах АН РФ и вузах под руководством М. А. Борца, Ю. А. Клячко, В. Л. Драгинского, Е. Д. Бабенкова и др. Вместе с тем в литературе и практике водоочистки отсутствует четкая методология выбора перемешивающего устройства для аппаратурного оформления процесса приготовления флокулянта. Несовершенство методов приготовления растворов приводит к тому, что значительное количество полимера попадает в суспензию в виде геля и ассоциатов, что приводит к перерасходу дорогостоящих флокулянтов и понижению эффективности их действия при агрегации дисперсий.

Флокулянты как товарный продукт выпускаются в виде гелей, растворов, эмульсий и порошков. Рабочие же растворы, используемые для дозирования, готовят с концентрацией 0,01–1 % в специальных установках, имеющих различную

конструкцию в зависимости от вида флокулянта. Пожалуй, наибольшие трудности вызывает растворение порошковых флокулянтов, представляющих собой полидисперсную смесь твердых частиц. Растворение, как правило, осуществляется в аппаратах с мешалками. При растворении флокулянтов в воде образуются истинные растворы, при этом процесс характеризуется следующими особенностями: набуханием, предшествующим растворению; высокой вязкостью раствора, низким коэффициентом диффузии, неспособностью молекул проникать через полупроницаемые мембраны [4].

Макромолекулы флокулянта достаточно гибкие и находятся в воде в свернутом состоянии в виде молекулярных клубков (рис. 1, а), которые начинают раскрываться по мере разбавления раствора (рис. 1, б).

Для того чтобы клубок из длинных цепей макромолекул полимера эффективно разворачивался, необходимо обеспечить хорошее смачивание всей его поверхности.

Следует отметить, что растворение высокомолекулярных флокулянтов невозможно в растворных баках с пневматическим перемешиванием [5], так как гель быстро оседает на дно. По этой причине в основном используются установки с механическим перемешиванием.

Цель работы

Цель данной работы — построение на основе экспериментальных исследований методики расчета максимально допустимой частоты вращения перемешивающего устройства с учетом геометрии рабочего колеса. При этом необходимо при-

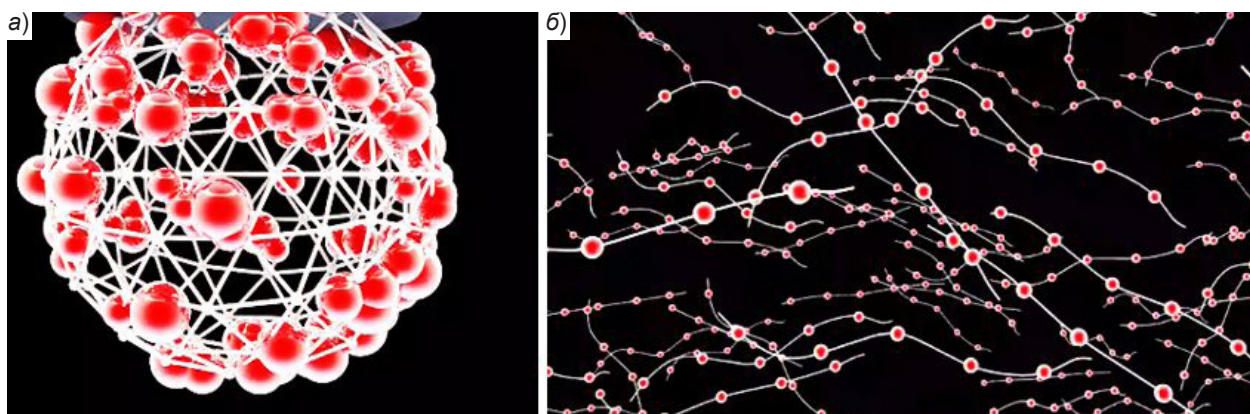


Рис. 1. Модель макромолекулы флокулянта в концентрированном (а) и разбавленном (б) водном растворе

нять во внимание, что сдвиговые напряжения на наружном диаметре лопастей мешалки не должны превышать параметры, определяемые реологическими свойствами флокулянта. На основе теоретического анализа максимальной частоты вращения необходимо сравнить несколько типов перемешивающих устройств, способствующих наиболее быстрому растворению флокулянта.

Теоретическая часть

Процесс растворения высокомолекулярных полимеров состоит из трех этапов: 1) смачивание дисперсных частиц флокулянта водой с образованием на поверхности гидратного слоя; 2) набухание — диффузное проникновение молекул воды в межмолекулярное пространство полимера с образованием геля; 3) непосредственно растворение полимера в воде или переход макромолекул в объем растворителя [10].

На первом этапе основная проблема — необходимость смачивания всей частицы целиком, что, по мнению авторов работы [12], затруднено большой вязкостью полимера. На наш взгляд, основными трудностями на данном этапе являются: 1) низкая поверхностная энергия полимеров, характеризуемая большими углами смачивания жидкостью; 2) неравнодоступность поверхности частиц, подаваемых в жидкость в виде слоя, когда доступ жидкости к частице блокируется соседними частицами. Если частица во время смачивания не полностью отделена от других, то на наружной поверхности этих частиц образуется слой геля, трудно пропускающий воду. Эти «комки» труднорастворимы; требуется несколько часов, чтобы их ликвидировать [12]. Отсюда напрашивается вывод о необходимости подвода достаточного количества энергии к поверхности частиц, как для их отделения друг от друга, так и для предотвращения образования комков.

После завершения первого этапа адсорбции и смачивания частиц полимера молекулы флокулянта продолжают разворачиваться и покидают наружную поверхность геля. Теперь они находятся в растворе в виде отдельных молекул. Скорость растворения полимера зависит от крупности частиц. Из литературы известно, что раствор полимера обладает свойствами неньютоновских жидкостей [3], однако данное утверждение справедливо для высоких концентраций полимера. В практике очистки сточных вод обычно исполь-

зуются концентрации 0,1–0,3 %. При анализе реологических кривых в статье [11] отмечено, что при малых концентрациях гели ведут себя практически как ньютоновские жидкости. Таким образом, в настоящем исследовании мы рассматриваем низкоконцентрированные растворы флокулянтов, процесс перемешивания которых можно приравнять к перемешиванию в системе жидкость–твердое.

Для того чтобы процесс набухания и растворения проходил как можно быстрее, необходимо поддерживать все частицы во взвешенном состоянии, равномерно распределенными по всему объему жидкости, при этом избегая больших срезающих усилий.

В большинстве случаев интенсивность механического перемешивания принято оценивать посредством среднеквадратичного градиента скорости G , который определяется по формуле [13]

$$G = \left(\frac{\varepsilon}{\mu_a} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ε — мощность, диссипируемая в единице объема жидкости (удельная скорость диссипации энергии), Вт/м³; μ_a — динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Авторы работы [8] утверждают, что среднеквадратичный градиент скорости G должен быть в пределах 200–1000 с⁻¹, в то время как в [3] полагают, что для распределения всех частиц по объему достаточно создать перемешивание, при котором $G = 100–400$ с⁻¹. Согласно рекомендациям фирм-производителей при приготовлении флокулянта перемешивание должно проходить в две стадии: сначала «быстро», а потом «медленно». Однако при установке перемешивающего устройства необходимо иметь детальную информацию о размере диаметра мешалки, скорости вращения, наилучшей геометрии (типе) рабочего колеса. Таким образом, в существующих литературных источниках информация относительно точного выбора мешалки и критериев эффективности перемешивания отсутствует.

Согласно формуле (1) среднеквадратичный градиент скорости зависит от мощности, вводимой в аппарат. Однако в условиях турбулентности решающее значение имеет полезный эффект от перемешивающего устройства. При расчете

градиента скорости исходя из мощности, диссипированной в единице объема жидкости, не принимаются во внимание особенности геометрии мешалки и, следовательно, распределение скоростей в окружном и осевом направлениях.

Повышение частоты вращения мешалки приводит к увеличению степени турбулизации потока и возрастанию скорости обтекания каждой частицы жидкостью. При достаточно сильной турбулизации потока происходит утончение ламинарной пленки вокруг частицы, в которой концентрация растворяемого вещества достигает насыщения, что способствует интенсификации процесса растворения частиц. Однако возрастание частоты вращения сопровождается увеличением касательных напряжений, вызывающих деструкцию макромолекул полимера. Вследствие этого повышение частоты вращения мешалки сверх оптимального значения недопустимо, так как приводит к резкому снижению технологических свойств готового раствора [1]. Эффективность растворения частиц флокулянта во многом определяется конструкцией аппарата и частотой вращения мешалки. Таким образом, надо удовлетворить двум противоречащим друг другу требованиям: 1) подвести достаточное количество энергии для растворения флокулянтов; 2) не допустить разрушения уже развернувшихся частиц флокулянта. Этим определяется необходимость проведения процесса в два этапа: сначала перемешивание должно быть интенсивным, а затем умеренным. Существует некоторая оптимальная частота вращения мешалки, которую назовем пороговой.

Методика расчета пороговой частоты вращения мешалки основана на определении касательных напряжений турбулентного трения Рейнольдса, создаваемых мешалкой во время ее работы и зависящих от геометрии мешалки. Данные напряжения не должны превышать напряжения сдвига, достаточные для разрушения макромолекул флокулянта.

Напряжения турбулентного трения рассчитываются из полуэмпирических моделей турбулентности, самая распространенная из которых модель Прандтля, согласно которой напряжение турбулентного трения τ_T (Па) определяется как

$$\tau_T = \rho L^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy}, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; L — путь смешения, м; du/dy — градиент окружной скорости в осевом направлении, 1/с.

Перенос вещества от поверхности растворяющейся частицы флокулянта в объем раствора складывается из гидродинамического и диффузионного процессов, которые в общем виде описываются дифференциальными уравнениями гидродинамики вязкой жидкости и конвективной диффузии. Основой анализа закономерностей турбулентного переноса в аппаратах с мешалками являются данные об особенностях гидродинамики перемешиваемой среды. Учитывая наличие осевой симметрии поля скоростей и постоянство профиля скорости по высоте в основной части объема, локальное значение коэффициента турбулентного переноса (D_T^{π}) на радиусе r определяется по формуле [10]

$$D_T^{\pi}(r) = \alpha_0^2 r_0^2 \left| \frac{du(r)}{dr} \right|, \quad (3)$$

где $\left| \frac{du(r)}{dr} \right|$ — градиент скорости на радиусе r , с⁻¹; α_0 — коэффициент.

Для быстроходных мешалок (турбинная, лопастная и т. д.) приоритетная область перемешивания — периферийная зона смешения (зона II на рис. 2).

Коэффициент турбулентной диффузии для периферийной зоны смешения определяется по формуле [2]

$$D_{T2} = \alpha_0^2 \omega_0 r_0^2 \frac{(\bar{R} - \bar{r}_m)^2}{\bar{R}^2 - \bar{r}_m^2} \times \left[1,6\psi_1 (\bar{r}_m^5 - 1) + 1,5\psi_2 (\bar{r}_m^4 - 1) + \right. \\ \left. + (\bar{r}_m^2 - 1) + 2(\psi_1 + \psi_2 + 1) \ln \bar{R} \right], \quad (4)$$

где ω_0 — угловая скорость вращения мешалки, 1/с;

$\bar{R} = D/d_m$ — главный геометрический критерий подобия: отношение диаметра аппарата D к диаметру мешалки d_m ;

r_0 — радиус мешалки, м;

$\bar{r}_m = 0,75 \cdot r_0$ — средняя величина безразмерного радиуса разделения первой и второй зон смешения в аппарате;

ψ_1, ψ_2 — параметры распределения окружной скорости, зависящие от геометрии перемешивающего устройства.

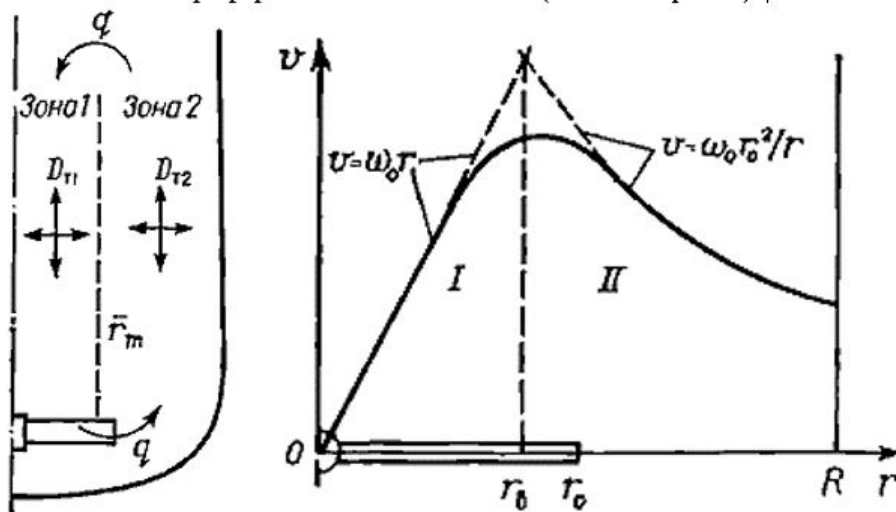


Рис. 2. Схема разделения центральной и периферийной зон перемешивания [12]

Приравнявая правые части выражений (3) и (4), получим формулу для абсолютного градиента скорости:

$$\left| \frac{du}{dy} \right| = \omega_0 \frac{(R - r_m)^2}{R^2 - r_m^2} \times \left[1,6\psi_1 (r_m^5 - 1) + 1,5\psi_2 (r_m^4 - 1) + (r_m^2 - 1) + 2(\psi_1 + \psi_2 + 1) \ln(R) \right]. \quad (5)$$

Длину пути перемешивания можно вычислить из полуэмпирической модели турбулентности, предложенной Карманом. Согласно ему, L можно рассчитать как [14]

$$L = k \cdot y, \quad (6)$$

где $k = 0,4$ — универсальная константа турбулентности;

$y = \pi d_m / z$ — расстояние по окружности между лопастями мешалки (z — число лопастей мешалки).

Зная значения абсолютного градиента скорости и длину пути перемешивания, по формуле Прандтля (2) можно рассчитать величину турбулентных напряжений Рейнольдса, создаваемых мешалкой определенной геометрии при различной частоте вращения.

В статье [11] изучены реологические свойства растворов высокомолекулярных флокулянтов, где показано, какие напряжения сдвига будут критическими для разрыва полимерных связей при различной концентрации порошка. С другой стороны, несложно построить график зависимости

напряжения турбулентного трения мешалки при различной частоте вращения для определенной геометрической формы мешалки. Совместив два графика на пересечении, найдем определяющую частоту вращения мешалки, т. е. максимально возможную частоту мешалки определенной геометрической формы, при которой молекулярные связи полимера будут сохраняться. Пример зависимости создаваемых мешалкой турбулентных напряжений и напряжений сдвига раствора флокулянта от частоты вращения мешалки, а также пороговая частота вращения перемешивающего устройства представлен на рис. 3.

Методы и материалы

Аппаратура и методика проведения экспериментальных исследований

Приготовление концентрированного раствора происходило в цилиндрической емкости диаметром 180 мм, высотой 200 мм (уровень раствора 160 мм). Мешалка была оснащена электрическим приводом мощностью 100 Вт (см. рис. 3). В качестве растворителя выступала водопроводная вода, температура которой составляла 20 °С [2].

В качестве полимера использовался высокомолекулярный флокулянт Magnaflok M 155 катионного типа с молекулярной массой 8–10 млн. Подробные реологические характеристики описаны в [11].

В качестве рабочих колес перемешивающего устройства были взяты стандартные виды мешалок — турбинная и трехлопастная мешалки,

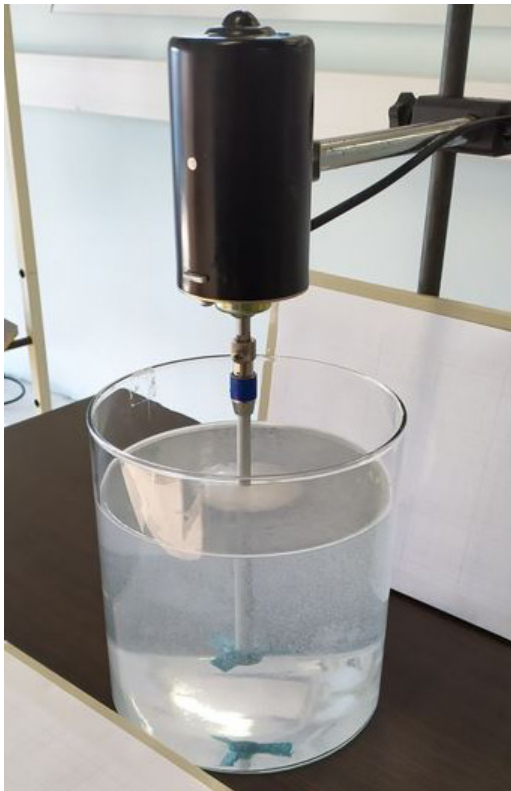


Рис. 3. Лабораторная установка для приготовления концентрированных растворов флокулянтов. Общий вид

а также разработанная нами коническая мешалка. Все мешалки имели диаметр 50 мм (рис. 4).

В емкость с заранее включенной мешалкой на рассчитанной частоте вращения добавляли порошковый флокулянт из расчета 3 г/л жидкости и засекали время до полного растворения полимера в воде. В объем жидкости 4 л добавляли 12 г порошка, постепенно добавляя его в центральную воронку (область в центре аппарата

непосредственно около вала) в течение 10 секунд. В лабораторных условиях не представляет труда медленное и равномерное дозирование порошка в емкость с работающей мешалкой непосредственно в центральную воронку. Это позволяет каждую частицу полимера смочить водой и исключить образование слипшихся «комков». Добавление порошка в центральную воронку также позволяет достичь быстрого распределения частиц полимера по всему объему жидкости.

Однородность готового раствора проверялась путем оценки показателя преломления лазерного луча. В гомогенных средах с постоянной оптической плотностью свет распространяется прямолинейно. Оценить полное растворение флокулянта можно с помощью пропускания направленного пучка света (лазера) через емкость с раствором в процессе его непрерывного перемешивания. Более подробно данная методика описана в [13].

Если раствор гомогенный, то его оптическая плотность одинаковая в каждой точке объема. Таким образом, лазер, проходя через раствор, будет иметь неизменный показатель преломления. Визуально это определится как неподвижная точка лазера на щите за емкостью с перемешиваемым раствором. Если же раствор флокулянта неоднородный, то в нем присутствуют нерастворившиеся полимерные «клубки», пропитанные водой и имеющие другую оптическую плотность по сравнению с водой. Так как такой раствор непрерывно перемешивается, то преломление пучка света будет меняться, т. е. среда будет иметь градиент показателя преломления. Со стороны это будет смотреться как постоянные колебания

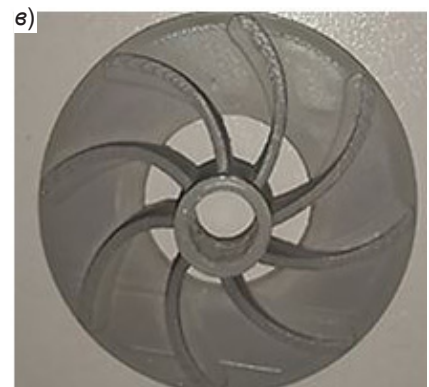
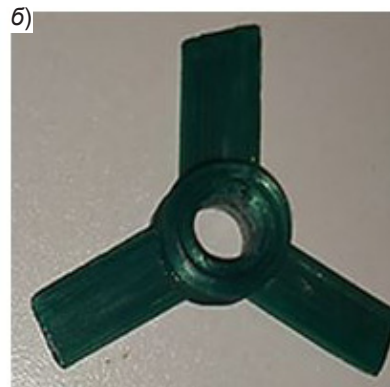
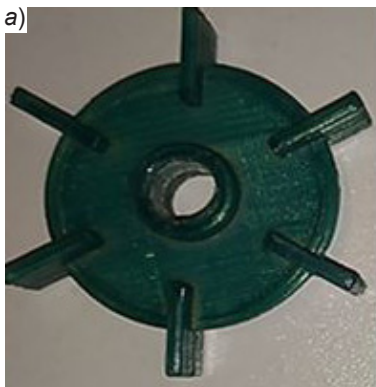


Рис. 4. Мешалки, использованные в экспериментах: а — турбинная; б — трехлопастная; в — коническая

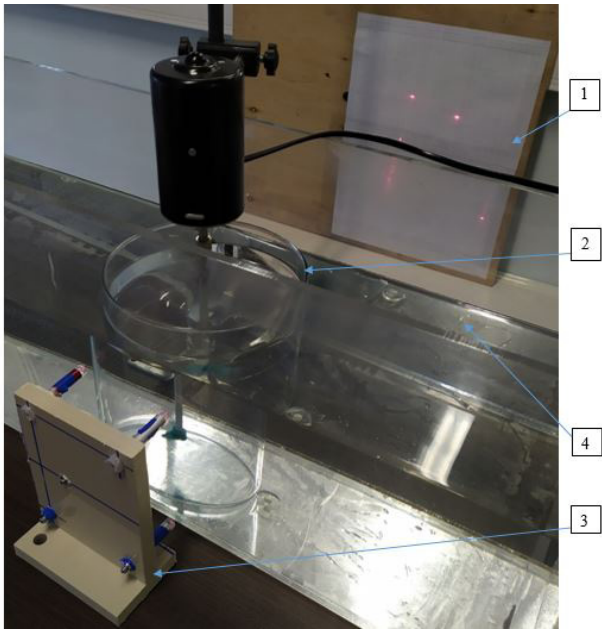


Рис. 5. Установка для определения однородности раствора:
1 — щит с миллиметровкой; 2 — емкость с раствором;
3 — платформа для закрепления лазерных указок; 4 —
прямоугольная емкость с водой для исключения искажения
луча при прохождении через цилиндрическую емкость

лазерной точки на щите позади емкости с раствором. Фотографии полученных изображений лазерных лучей представлены на рис. 6. Подробно метод исследования описан в [7].

В качестве проверочного показателя по завершении растворения флокулянта измеряется вязкость с помощью вискозиметра по стандартной методике. Вязкость приготовленных концентрированных растворов во время проведения экспериментов оставалась примерно одинаковой и соответствовала данным, указанным в [4].

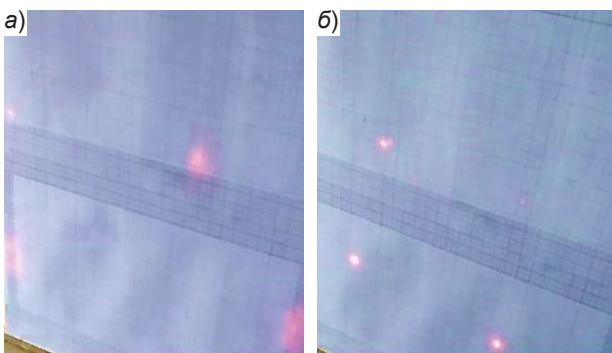


Рис. 6. Внешний вид лазерного луча при наличии в аппарате нерастворенного флокулянта (а) и гомогенного раствора (б)

В теоретических расчетах в целях нахождения пороговой частоты вращения мешалки для перемешивания и растворения флокулянта для исследуемых мешалок были приняты следующие параметры распределения окружной скорости [2]:

- коническая мешалка — $\psi_1 = 1,65, \psi_2 = -2,56$;
- турбинная мешалка — $\psi_1 = 2, \psi_2 = -3$;
- трехлопастная мешалка — $\psi_1 = 1,3, \psi_2 = -2,13$.

Так как в эксперименте для растворения использована вода, то плотность жидкости принималась 1000 кг/м^3 , а абсолютная вязкость — $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Коэффициент гидравлического сопротивления рабочего колеса K_N при турбулентном режиме перемешивания составил 0,3 для конической мешалки [6], 4,16 — для турбинной, 0,46 — для трехлопастной [2], мощность на перемешивание рассчитывалась по формуле, приведенной в [6].

Результаты исследований и их обсуждение

Пример построения графика для определения пороговой частоты вращения конической мешалки представлен на рис. 7.

График зависимости градиента скорости du/dy (по существу совпадает со значением скорости сдвига в данных условиях) от напряжения сдвига τ был использован из [11], данные были взяты для 0,3 %-ного раствора флокулянта с молекулярной массой 5–8 млн. График зависимости величины турбулентных напряжений Рейнольдса, создаваемых мешалкой определенной геометрии

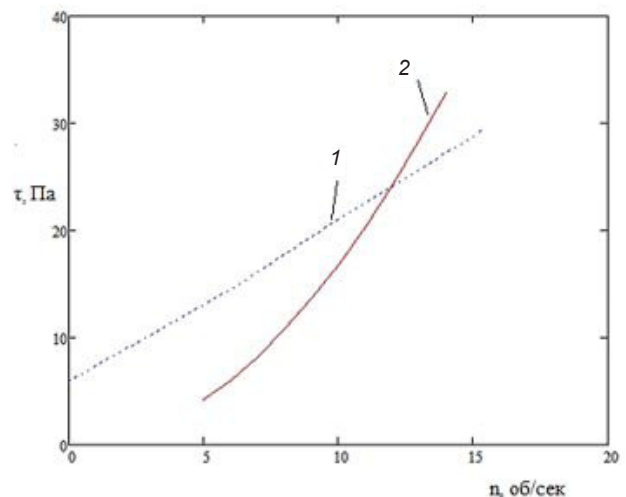


Рис. 7. Совмещенный график зависимости вводимых конической мешалкой турбулентных напряжений (линия 2) и напряжений сдвига флокулянта Magnafloc M155 (линия 1) от частоты вращения n

при различной частоте вращения, от скорости сдвига рассчитывали по формуле Прандтля (2). На пересечении кривых находится точка критического градиента скорости, выше которого значения напряжений становятся разрушительными для молекул флокулянта.

Результаты расчета определяющей частоты вращения, времени растворения и мощности на перемешивание представлены в таблице.

Отношение Q/N характеризует количество циклов растворения в час, приходящееся на каждый ватт затраченной мощности на перемешивание. Чем выше этот показатель, тем эффективней используется вводимая в аппарат энергия. Таким образом, с использованием конической мешалки можно перемешивать флокулянт на наибольшей частоте вращения среди исследованных мешалок, так как она создает меньше сдвиговых напряжений во время работы за счет обтекаемой формы лопастей. Применение турбинной мешалки на высоких частотах вращения ограничено, поскольку она создает опасные сдвиговые напряжения за счет острых кромок лопаток, расположенных под углом 90° к плоскости вращения. Причем аппарат с конической мешалкой не только самый производительный, но и самый выгодный с точки зрения отношения полезного эффекта (кратность объемов аппарата, которое можно перемешать за час) к затратам (потребляемой мощности мешалки).

В результате работы было установлено, что применение новой конической мешалки позволяет ускорить процесс приготовления флокулянтов в 1,5 раза по сравнению с наиболее распространенной лопастной мешалкой и в 1,25 раза по сравнению с турбинной. Следовательно, для правильного подбора мешалки определенной

геометрической формы в целях приготовления растворов флокулянта необходимо:

- выбрать диаметр мешалки и длину вала в зависимости от размеров аппарата исходя из рекомендаций для данного типа перемешивающего устройства в целях эффективного суспендирования в системе жидкость–твердое;
- определить значения градиента скорости в осевом направлении по формуле (5); параметры распределения скоростей для стандартных мешалок можно получить из справочных данных, например, воспользовавшись [9];
- рассчитать путь перемешивания по формуле (6);
- построить график зависимости напряжений сдвига от частоты вращения мешалки для данного диаметра, вычислив значения по формуле (2);
- найти определяющую скорость вращения мешалки путем совмещения графиков; для нахождения определяющей скорости необходимо иметь данные о реологических свойствах растворов флокулянтов;
- рассчитать мощность, необходимую для перемешивания по формуле из [5].

Следует отметить, что вышеизложенная методика приемлема только для низкоконцентрированных растворов, которые имеют свойства ньютоновской жидкости.

Заключение

Исследованию эффективности применения того или иного флокулянта посвящено множество трудов [15, 16, 17]. В ходе настоящей работы разработана методика подбора мешалки для приготовления концентрированного раствора полимера необходимой концентрации. Теоретический расчет был основан на стандартной полуэмпирической модели турбулентности Прандтля, дополненной Карманом. По результатам расче-

Результаты расчетов определяющей частоты перемешивания 0,3% раствора флокулянта для каждого типа мешалки

Тип мешалки	Пороговая частота вращения, об/сек	Мощность на перемешивание N, Вт	Время растворения T, мин	Производительность аппарата Q (60/T)	Отношение Q/N , $Вт^{-1}$
Коническая	12	0,162	40	1,5	7,31
Трехлопастная	7,5	0,061	60	1	6,32
Турбинная	6	0,281	50	1,2	2,1

тов с помощью конической мешалки можно перемешивать флокулянт на наибольшей частоте вращения среди используемых в исследовании рабочих колес, так как она создает меньше сдвиговых напряжений во время работы за счет обтекаемой формы лопастей. Применение турбинной мешалки на высоких частотах вращения ограничено, поскольку она создает опасные сдвиговые напряжения за счет острых кромок лопаток, расположенных под углом 90° к плоскости вращения. Аппарат с конической мешалкой по отношению полезного эффекта к затратам на потребляемую электроэнергию также является наиболее привлекательным.

Литература

- Аксенов, В. И. (ред.) (2008). Применение флокулянтов в системах водного хозяйства: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 92 с.
- Брагинский, Л. Н., Бегачев, В. И. и Барабаш, В. М. (1984). Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, 336 с.
- Вейцер, Ю. И. и Минц, Д. М. (1984). Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод. 2-е изд. М.: Стройиздат, 201 с.
- Гандурина, Л. В. (2007). Очистка сточных вод с применением синтетических флокулянтов. Монография. М.: ДАР/ВОДГЕО, 198 с.
- Гетманцев, С. В., Нечаев, И. А. и Гандурина, Л. В. (2008). Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 271 с.
- Григорьева, А. Н. и Абиев, Р. Ш. (2019). Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ-жидкость. *Химическая промышленность сегодня*, № 5, сс. 18–22.
- Евменова, Г. Л. и Байченко, А. А. (1998). Гомогенизация растворов высокомолекулярных полимеров при флокуляции угольных дисперсий. В: Симпозиум «Неделя горняка–98», 2–6 февраля 1998 г. М.: МГТУ, сс. 128–129.
- Запольский, А. К. и Баран, А. А. (1987). Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: свойства. Получение. Применение. Л.: Химия, 208 с.
- СОЮЗХИММАШ (1985). РД 26-01-90-85 Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/1200043740> [Дата обращения: 20.02.2020].
- Тагер, А. А. (1978). Физико-химия полимеров. 3-е изд. М.: Химия, 544 с.
- Ульрих, Е. В., Шевченко, Т. В., Пирогов, А. Н. и Мидуница, Ю. С. (2011). Изучение реологических свойств флокулянтов. *Химическая промышленность сегодня*, № 5, сс. 25–28.
- Фролов, В. С. и Удовицкий, В. И. (2009). Приготовление порошкообразных флокулянтов на углеобогатительных предприятиях Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, сс. 240–243.
- Хенце, М., Армоэс, П., Ля-Кур-Янсен, Й. и Арван, Э. (2006). Очистка сточных вод: биологические и химические процессы. М.: Мир, 480 с.
- Ши-и, Б. (1962). Турбулентное течение жидкостей и газов. М.: Издательство иностранной литературы, 344 с.
- Tian, Z., Zhang, L., Sang, X., Shi, G. and Ni, C. (2020). Preparation and flocculation performance study of a novel amphoteric alginate flocculant. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 141, 109408. DOI: 10.1016/j.jpcs.2020.109408.
- Wang, Z., Huang, W., Yang, G., Liu, Y. and Liu, S. (2019). Preparation of cellulose-base amphoteric flocculant and its application in the treatment of wastewater. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 215, pp. 179–188. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.03.097.
- Yusoff, M. S., Aziz, H. A., Zamri, M. F. M. A., Suja, F., Abdullah, A. Z. and Basri, N. E. A. (2018). Floc behavior and removal mechanisms of cross-linked *Durio zibethinus* seed starch as a natural flocculant for landfill leachate coagulation-flocculation treatment. *Waste Management*, Vol. 74, pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.01.016.

References

- Aksenov, V. I. (ed.) (2008). Use of flocculants in water carriage systems: study guide. Yekaterinburg: Ural State Technical University–Ural Polytechnic Institute, 92 p.
- Braginsky, L. N., Begachev, V. I. and Barabash, V. M. (1984). Mixing in liquid media: physical principles and engineering calculation methods. Leningrad: Khimiya, 336 p.
- Veitser, Yu. I. and Mints, D. M. (1984). High molecular weight flocculants in natural water and wastewater treatment. 2nd edition. Moscow: Stroyizdat, 201 p.
- Gandurina, L. V. (2007). Wastewater treatment using synthetic flocculants. Monograph. Moscow: DAR/VODGEO, 198 p.
- Getmantsev, S. V., Nechaev, I. A. and Gandurina, L. V. (2008). Industrial wastewater treatment with coagulants and flocculants. Moscow: ASV Publishing House, 271 p.
- Grigorieva, A. N. and Abiev, R. Sh. (2019). Influence of the impellers shape on the diameter of air bubbles by mixing of a gas-liquid system. *Chemical Industry Today*, No. 5, pp. 18–22.
- Evmenova, G. L. and Baychenko, A. A. (1998). Homogenization of solutions of high molecular weight polymers during the flocculation of coal dispersions. In: Miner Week–98 Symposium. Moscow: Moscow State Mining University, pp. 128–129.
- Zapolsky, A. K. and Baran, A. A. (1987). Coagulants and flocculants in water treatment: properties, preparation, and application. Leningrad: Khimiya, 208 p.
- SOYUZKHIMMASH (1985). Regulatory Document 26-01-90-85 Mechanical mixing devices. Calculation Method. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200043740> [Date accessed 20.02.2020].
- Tager, A. A. (1978). Physicochemistry of polymers. 3rd edition. Moscow: Khimiya, 544 p.
- Ulrih, E. V., Schevchenko, T. V., Pirogov, A. N. and Midunitsa, Yu. S. (2011). Rheological properties of flocculants. *Chemical Industry Today*, No. 5, pp. 25–28.

12. Frolov, V. S. and Udovitskiy, V. I. (2009). Preparation powder flocculations on coal preparation plants of Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, No. 7, pp. 240–243.

13. Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J. and Arvin, E. (2006). Wastewater treatment. Biological and chemical processes. Moscow: Mir, 480 p.

14. Shih-i, P. (1962). Turbulent flow of liquids and gases. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 344 p.

15. Tian, Z., Zhang, L., Sang, X., Shi, G. and Ni, C. (2020). Preparation and flocculation performance study of a novel amphoteric alginate flocculant. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 141, 109408. DOI: 10.1016/j.jpics.2020.109408.

16. Wang, Z., Huang, W., Yang, G., Liu, Y. and Liu, S. (2019). Preparation of cellulose-base amphoteric flocculant and its application in the treatment of wastewater. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 215, pp. 179–188. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.03.097.

17. Yusoff, M. S., Aziz, H. A., Zamri, M. F. M. A., Suja, F., Abdullah, A. Z. and Basri, N. E. A. (2018). Floc behavior and removal mechanisms of cross-linked *Durio zibethinus* seed starch as a natural flocculant for landfill leachate coagulation-flocculation treatment. *Waste Management*, Vol. 74, pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.01.016.

Авторы

Григорьева Анастасия Николаевна, аспирант
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

АО «Астерион», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: an@ast-pump.ru

Абиев Руфат Шовкетович, д-р техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

E-mail: abiev.rufat@gmail.com

Authors

Grigoreva Anastasia Nikolaevna, P.G.
Saint-Petersburg State Institute of Technology,
St. Petersburg, Russia

Asterion JSC, St. Petersburg, Russia

E-mail: an@ast-pump.ru

Abiev Rufat Shovketovich, Dr. of Engineering, Professor
Saint-Petersburg State Institute of Technology,
St. Petersburg, Russia

E-mail: abiev.rufat@gmail.com