

УДК 622.7

DOI: 10.15587/2313-8416.2019.189708

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФЛОКУЛЯЦИИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

А. В. Шестопапов, А. С. Брянкин, Н. И. Рыкусова, О. С. Гетта

*Исследовано влияние концентрации твердой фазы и расхода флокулянта на изменение скорости оседания твердой фазы и прочность флокул. Предложена методика оптимизации параметров агрегатобразования и повышения прочности флокул после гидромеханических воздействий, учитывающая концентрацию твердой фазы и расход флокулянта. Было установлено, что оптимальные условия агрегатобразования возможно обеспечить путем минимизации гидромеханических воздействий на флокулы, а так же создания наилучших условий флокулообразования. Среди путей оптимизации процесса анализировались способы влияния на эти факторы за счет технологических особенностей введения процесса, таких как корректировка концентрации, скорость транспортировки сфлокулированного шлама, время перемешивания*

**Ключевые слова:** флокуляция, агрегатобразование, прочность агрегатов, скорость осаждения, оптимизация, гидромеханическое разрушение флокул

Copyright © 2019, O. Shestopalov, O. Briankin, N. Rykusova, O. Hetta.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

### 1. Введение

Промышленные предприятия Украины все еще потребляют значительное количество воды из природных источников. Предприятия черной металлургии являются наибольшими потребителями воды в промышленности. На этих предприятиях достаточно широко применяется оборотное водоснабжение, но количество сточных вод, которые сбрасываются в водоемы составляет более 1 млрд м<sup>3</sup>/год.

Повышение требований к очищаемой воде при сбросе ее в водоемы, а также необходимость глубокой очистки оборотной воды от взвешенных веществ при использовании ее для нужд предприятия приводят к созданию замкнутых водооборотных циклов и соответствующего оборудования. В сложившейся промышленной практике частицы крупностью более 50 мкм в основном улавливаются в отстойных сооружениях без использования реагентов, частицы 10 – 50 мкм – в отстойных сооружениях с использованием реагентов. Однако, не всегда расход реагентов оптимизирован. Это приводит к низкой эффективности очистки воды от взвешенных веществ и как следствие ее сбросу в результате продувки. Либо к неоправданному перерасходу реагентов. Поэтому вопросы оптимизации расхода реагентов при очистке сточных вод являются актуальными.

### 2. Литературный обзор

Флокуляция широко используется для очистки сточных вод, поскольку она эффективна и проста в эксплуатации [1]. В этом процессе на эффективность агрегации твердой фазы могут влиять многие факторы, такие как тип и дозировка флокулянта [2], значение pH [3], скорость и время смешивания реагентов [4], концентрация твердой фазы и ее дисперсность [5, 6].

Оптимизация этих факторов может значительно повысить эффективность процесса. В традиционных многофакторных экспериментах оптимизация обычно осуществляется путем изменения одного фактора при сохранении всех остальных факторов фиксированными при определенном наборе условий [7].

За последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в понимании сложных турбулентных взаимодействий, которые влияют и управляют процессом флокуляции [8]. Усовершенствование инструментов моделирования и симуляции привело к использованию вычислительных методов в исследованиях турбулентных течений. Тем не менее, численное исследование турбулентного потока и процесса флокуляции все еще проводится независимо.

Скорость осаждения флокул зависит от их размера и прочности к разрушающим воздействиям. Размер агрегатов варьируется от молекулярных размеров до диапазона, который виден невооруженному глазу [8, 9]. Рост и разрушение флокул в объеме жидкости происходят одновременно – растущие хлопья подвергаются разрушению, в то время как фрагменты разрушенных флокул подвергаются агрегации [10]. Сложность и многофакторность процесса флокуляции реальных промышленных стоков не позволяют разработать универсальные для всех типов загрязнений рекомендации по очистке. Это и обуславливает особую актуальность исследований в области агрегации взвешенных частиц с применением флокулянтов.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью проведения исследований было анализ путей оптимизации параметров агрегатобразования, седиментации и разрушения образованных флокул на модельном шламе.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- выявить особенности осаждения и прочности флокул в зависимости от концентрации твердой фазы, расхода флокулянта и условий гидромеханического перемешивания;
- проанализировать пути управления процессом агрегатообразования с целью оптимизации процесса очистки сточной воды

#### 4. Материалы и методы исследований

Экспериментальные исследования проводились на модельных растворах сточных вод с регулируемой концентрацией в интервале от 4 до 30 г/л, которые готовили путем смешения навески твердой фазы нужной массы с водой. Для создания модельной тонкодисперсной сточной воды использовали пыль сухой газоочистки литейного цеха одного из металлургических предприятий. Более подробно методика исследований и первичной обработки результатов экспериментов описана в [11]. Изучение влияния гидромеханического воздействия на сфлокулированный шлам осуществляли с помощью лабораторной магнитной мешалки с регулируемым числом оборотов и цифровым дисплеем ММ-85-2 (Китай).

Математическая обработка результатов экспериментов и визуализации данных выполнялась с помощью программного пакета Statistica. В качестве функции отклика в опытах рассматривались описанные следующие критерии – скорость осаждения флокул после агрегатообразования ( $V_1$ ) и эта же скорость после гидромеханического воздействия определенной интенсивности в течение определенного времени ( $V_2$ ).

Целью решения оптимизационной задачи являлась минимизация расхода флокулянта ( $C_{\text{флок}} \rightarrow \min$ ) при условии достижения достаточной скорости осаждения флокул ( $V_1$ ) и ( $V_2$ ). Поэтому в ходе анализа рассматривались факторы, влияющие на расход флокулянта и скорость осаждения твердой фазы. Среди путей оптимизации процесса анализировались способы влияния на эти факторы за счет технологических особенностей введения процесса, таких как корректировка концентрации, скорость транспортировки сфлокулированного шлама, время перемешивания. Анализ проводился с помощью методологии поверхности отклика, более подробно описанной в [12], показывающей наглядно зависимость искомой функции от двух факторов и позволяющей оценить воздействия нескольких факторов и выполнить поиск оптимальных условий для желаемого отклика.

#### 5. Результаты исследований

В результате исследований, описанных в [11] было установлено, что скорость осаждения флокул зависит от концентрации твердой фазы, расхода флокулянта и гидродинамических особенностей ведения процесса.

Проанализируем зависимость скорости осаждения флокул от концентрации твердой фазы и расхода флокулянта (рис. 1). Анализ рис. 1 показывает, что с ростом концентрации твердой фазы скорость осаждения флокул существенно снижается даже при

большем расходе флокулянта. В диапазоне концентраций модельного шлама 8–12 г/л наблюдаются наилучшие условия агрегатообразования и максимальные скорости осаждения даже при минимальном расходе флокулянта.



Рис. 1 Зависимость скорости осаждения флокул от концентрации твердой фазы и расхода флокулянта

Более показательным является зависимость расхода флокулянта от концентрации твердой фазы для достижения определенной скорости осаждения (рис. 2). Анализ этих данных показывает, что поддержания скорости осаждения на определенном уровне (например, 6 мм/с) при возрастании концентрации твердой фазы от 10 до 30 г/л требует увеличения расхода флокулянта более чем в 3 раза на единицу массы.

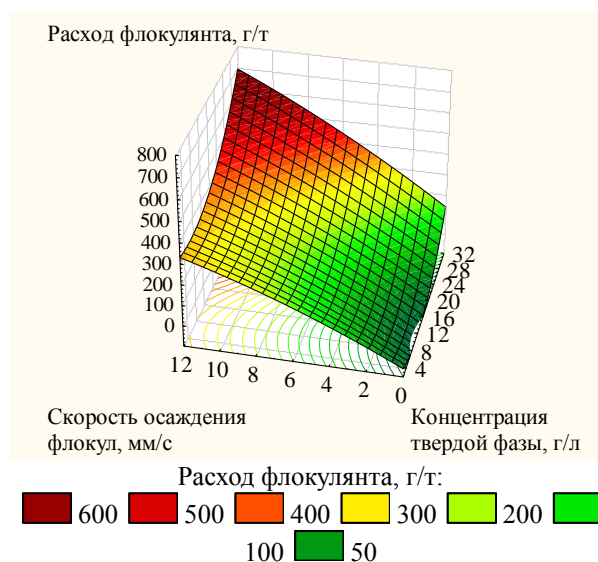


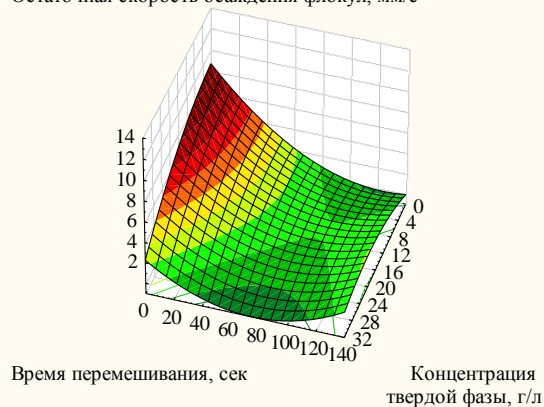
Рис. 2. Зависимость расхода флокулянта от концентрации твердой фазы

Описанные зависимости позволяют рассчитать расход реагентов или корректировать их расход в зависимости от колебаний концентрации [11]. В то же время очевидным является то, что для данного вида шлама существует оптимальная концентрация твер-

дой фазы, проводящая к образованию достаточно крупных и прочных флокул. При такой концентрации удельный расход флокулянта на единицу массы загрязнений будет наименьшим. Исследования, проведенные со сточными водами углебогатительных фабрик [5, 6] и буровыми стоками [13] также подтверждают этот факт. Однако для каждого типа сточной воды в зависимости от других условий оптимальная концентрация может отличаться. Это позволяет рекомендовать проведение флокуляции при наилучших условиях путем не изменения дозировки флокулянта, а корректировки концентрации сточной воды. Такой путь возможен, если сточная вода перед очисткой направляется в резервуар-усреднитель, в котором можно разбавить ее до оптимальной концентрации очищенной водой и существенно снизить расход флокулянта.

Исследование влияния интенсивности и времени перемешивания от концентрации твердой фазы рис. 3 показывает, что флокулы разрушаются достаточно быстро – в течение 1 – 2 минут при достаточной интенсивности перемешивания при транспортировке. Так же данные рис. 3 показывают, что с ростом концентрации более твердой фазы разрушение флокул происходит интенсивнее, чем при низких концентрациях. Это объясняется тем, что при более высоких концентрациях твердой фазы флокулянт не полностью смешивается со всеми частицами, то есть образуются сгустки флокулянта, окруженные твердой фазой, препятствующей качественному мостикообразованию всех частиц.

Остаточная скорость осаждения флокул, мм/с



Остаточная скорость осаждения агрегатов, мм/с:  
 10 8 6 4 2 0

Рис. 3. Зависимость скорости осаждения флокул от концентрации твердой фазы и времени гидромеханического воздействия (при постоянном расходе флокулянта 200 г/т и интенсивности перемешивания 800 об/мин)

Исследование влияния дозы флокулянта на прочность флокул при определенном гидромеханическом воздействии (рис. 4) показывает, что сохранение остаточной скорости после транспортировки шлама требует тем больше флокулянта, чем выше концентрация твердой фазы. На практике при транспортировке сфлокулированного шлама проводят так называемую «дофлокуляцию» – добавляют новую

порцию флокулянта перед обезвоживанием. Анализ рис. 4 свидетельствует, что при правильно проведенной флокуляции с оптимальной концентрацией твердой фазы, (например, 10 г/л) прочность флокул существенно возрастает при минимальном расходе флокулянта (рис. 5). В то же время для увеличения прочности флокул более концентрированной сточной воды на каждую дополнительную единицу скорости осаждения требуется существенный расход флокулянта.

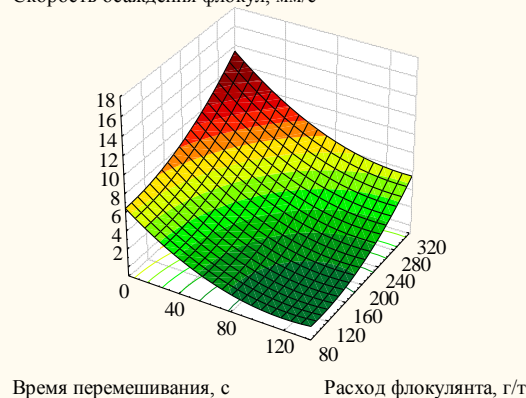
Расход флокулянта, г/т



Рис. 4. Зависимость скорости осаждения флокул после гидромеханического воздействия в течение 40 с при скорости движения шлама до 2 м/с от концентрации твердой фазы и расхода флокулянта

Для оптимальной концентрации данной сточной воды была установлена зависимость скорости осаждения флокул от расхода флокулянта и времени гидромеханического воздействия при средней скорости движения жидкости 2 м/с (рис. 5).

Скорость осаждения флокул, мм/с



Скорость осаждения агрегатов, мм/с:  
 12 10 8 6 4 2

Рис. 5. Зависимость скорости осаждения флокул для сточной воды концентрацией 10 г/л

Анализ рис. 5 позволяет оптимизировать расход флокулянта путем минимизации времени механического воздействия, то есть ликвидации необходимости перекачки сфлокулированного шлама или его задержек между оборудованием. В противном случае потребуется дополнительный расход флокулянта. Построение такой зависимости позволяет вы-

брать оптимальное время перемещения сточной воды между аппаратами и расход флокулянта, позволяющий получить требуемую скорость без перерасхода.

Кроме времени существенное влияние оказывает интенсивность воздействия на образованные агрегаты. Рассмотрим изменение прочности флокул на примере одной пробы сточной воды с концентрацией твердой фазы 10 г/л и расходе флокулянта 200 г/т при различных режимах перемешивания (рис. 6). Анализ рис. 6 показывает, что снижение интенсивности перемешивания при транспортировке оказывает меньшее разрушающее действие на флокулы. Поэтому одним из способов оптимизации сохранения прочности флокул является выбор «щадящего» режима транспортировки путем снижения скорости течения сфлокулированной сточной воды до обезвоживающего оборудования. Простым технологическим решением, без снижения производительности установок очистки стоков, может быть увеличение диаметра транспортного трубопровода и отказ от использования насосов для перекачки сгущенного шлама (перемещение на обезвоживание после отстойников самотеком).

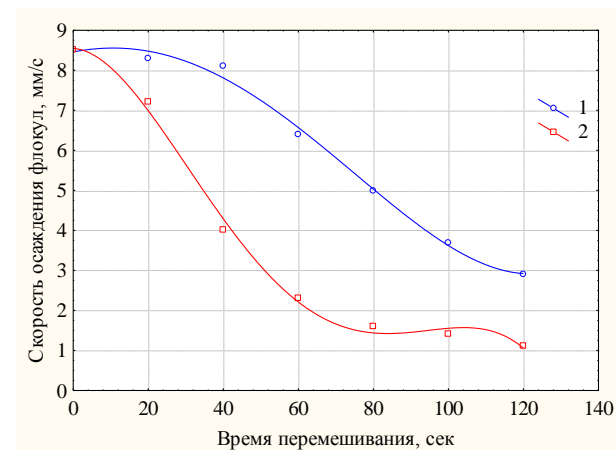


Рис. 6. Зависимость скорости осаждения флокул при различной интенсивности перемешивания сфлокулированного шлама:  
1 – 400 об/мин, 2 – 800 об/мин

Так же было установлено, что время флокулообразования при введении флокулянтов для сточных вод различной концентрации отличается (рис. 7).

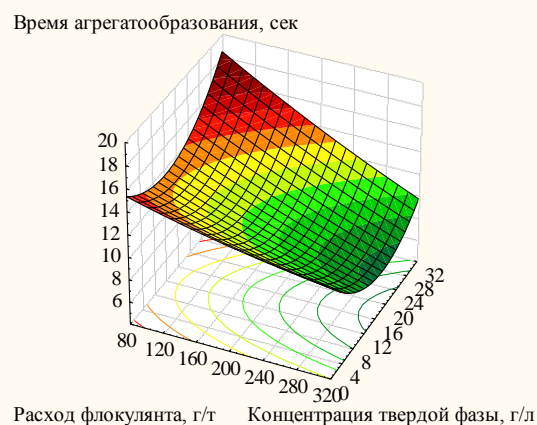


Рис. 7. Время образования флокул при перемешивании

Анализ рис. 7 показывает, что время образования флокул зависит от концентрации твердой фазы и расхода флокулянта. При концентрации твердой фазы, близкой к оптимальной, время смешения с флокулянтном и образование флокул начинается примерно через 8 – 10 секунд, а при других условиях позже. При избыточном расходе флокулянта время образования флокул снижается. Не соблюдение в промышленных условиях времени флокулообразования может привести к тому, что в отстойник могут попасть агрегаты не успевшие сформироваться или наоборот, флокулы, успевшие уже разрушиться вследствие гидромеханических воздействий.

## 6. Выводы

1. Установлено влияние на скорость осаждения и прочности флокул концентрации твердой фазы, расхода флокулянта и условий гидромеханического перемешивания. Описаны примеры подбора оптимальных параметров этих факторов, способствующие снижению расхода флокулянта для достижения максимальной эффективности агрегатообразования.

2. Выделены следующие направления управления процессом агрегатообразования: создания оптимальных условий флокуляции путем подбора оптимальной концентрации твердой фазы, времени смешения с флокулянтном и условий транспортировки сфлокулированного шлама.

## Литература

- Walsh, M. E., Zhao, N., Gora, S. L., Gagnon, G. A. (2009). Effect of coagulation and flocculation conditions on water quality in an immersed ultrafiltration process. *Environmental Technology*, 30 (9), 927–938. doi: <http://doi.org/10.1080/09593330902971287>
- Nandy, T., Shastry, S., Pathe, P. P., Kaul, S. N. (2003). Pre-treatment of currency printing ink wastewater through coagulation-flocculation process. *Water, Air, and Soil Pollution*, 148 (1/4), 15–30. doi: <http://doi.org/10.1023/a:1025454003863>
- Laue, C., Hunkeler, D. (2006). Chitosan-graft-acrylamide polyelectrolytes: Synthesis, flocculation, and modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 102 (1), 885–896. doi: <http://doi.org/10.1002/app.24188>
- Gurse, A., Yalcin, M., Dogar, C. (2003). Removal of Remazol Red RB by using Al(III) as coagulant-flocculant: effect of some variables on settling velocity. *Water, Air, and Soil Pollution*, 146 (1/4), 297–318. doi: <http://doi.org/10.1023/a:1023994822359>
- Shkop, A., Tseitlin, M., Shestopalov, O. (2016). Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (84)), 35–40. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86085>
- Shkop, A., Tseitlin, M., Shestopalov, O., Raiko, V. (2017). Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (85)), 20–26. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91031>

7. Wang, Y., Chen, K., Mo, L., Li, J., Xu, J. (2014). Optimization of coagulation–flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (2), 391–396. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.04.033>
8. Bridgeman, J., Jefferson, B., Parsons, S. A. (2009). Computational Fluid Dynamics Modelling of Flocculation in Water Treatment: A Review. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 3 (2), 220–241. doi: <http://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015267>
9. Bache, D. H. (2004). Flocculation and turbulence: a framework for analysis. *Chemical Engineering Science*, 59 (12), 2521–2534. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.055>
10. Hogg, R.; Dobias, B., Stechemesser, H. (Eds.) (2005). Flocculation and dewatering of fine-particle suspension. *Coagulation and flocculation*. Boca Raton: CRC Press, 805–850. doi: <http://doi.org/10.1201/9781420027686.ch12>
11. Shestopalov, O., Briankin, O., Tseitlin, M., Raiko, V., Hetta, O. (2019). Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (101)), 6–13. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>
12. Trinh, T. K., Kang, L. S. (2011). Response surface methodological approach to optimize the coagulation–flocculation process in drinking water treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 89 (7), 1126–1135. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.12.004>
13. Shestopalov, O., Rykusova, N., Hetta, O., Ananieva, V., Chynchyk, O. (2019). Revealing patterns in the aggregation and deposition kinetics of the solid phase in drilling wastewater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (97)), 50–58. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.157242>

*Received date 21.11.2019*

*Accepted date 10.12.2019*

*Published date 30.12.2019*

**Шестопалов Алексей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: [shestopalov.it@khpі.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khpі.edu.ua)

**Брянкин Александр Сергеевич**, аспирант, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002

**Рыкусова Надежда Ивановна**, аспирант, кафедра Химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: [n\\_rykusova@ukr.net](mailto:n_rykusova@ukr.net)

**Гетта Оксана Сергеевна**, аспирант, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: [oksanagetta21@gmail.com](mailto:oksanagetta21@gmail.com)