

УДК 622.793

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ СОХРАННОСТЬ ФЛОКУЛЯЦИОННЫХ СТРУКТУР**

А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг

*Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: gr_yu_g@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрен механизм разрушения флокуляционных структур в минеральных суспензиях под действием сдвига. Установлена зависимость предельного динамического напряжения сдвига от диаметра частиц и расхода флокулянта. Рассчитано, что для сохранения флокуляционных структур максимальная допустимая скорость течения суспензии по трубопроводам диаметром 0.2–0.6 м при расходе флокулянта 50 г/т составляет в среднем 1.8 м/с, а для расходов 100 и 200 г/т — соответственно 2.6 и 3.9 м/с. Решена обратная задача — определены минимальные допустимые значения диаметра трубопровода. При объемном расходе суспензии 100–1000 м³/ч и расходе флокулянта 50–200 г/т эти значения находятся в пределах от 0.1 до 0.4 м. При прочих равных условиях увеличение расхода флокулянта в 2 раза для указанных пределов обуславливает уменьшение минимального допустимого диаметра трубопровода в среднем на 20 %.

Флокуляционные структуры, флокулянты, минеральные суспензии, режим течения, неизотропная турбулентность, напряжение сдвига, деструкция

DOI: 10.15372/FTPRPI20190313

Современные технологии сгущения и обезвоживания тонкодисперсных продуктов переработки минерального сырья с применением флокулянтов перспективны с экономической и экологической точек зрения. Образование агрегатов частиц за счет мостиковых связей обеспечивает повышение скорости разделения твердой и жидкой фаз, уменьшение содержания минеральных частиц в технологической воде, что способствует повышению эффективности обогащения гравитационными методами и флотацией. Флокулянты незаменимы для работы замкнутых водооборотных циклов на обогатительных фабриках и широко распространены в практике обогащения. Однако недостаточная изученность закономерностей процесса флокуляции затрудняет обеспечение максимальной эффективности разделения суспензий. Существенной проблемой является деструкция агрегатов частиц в процессах перемешивания суспензий с флокулянтами и транспортирование суспензий. Происходит снижение скорости разделения твердой и жидкой фаз седиментацией, фильтрованием и центрифугированием, а также увеличение содержания твердой фазы в осветленной воде. Рекомендации по рациональному ведению указанных процессов с точки зрения сохранности агрегатов частиц не учитывают их прочностные характеристики во взаимосвязи с гидродинамическими параметрами течения суспензий.

Цель настоящей работы — аналитическое определение гидродинамических параметров течения суспензий, обеспечивающих сохранность агрегатов частиц, на основании сведений об их прочности. Рассматривается поступательное течение суспензий по трубопроводам.

На прочность агрегатов частиц решающее влияние оказывают свойства твердой фазы, флокулянта, а также условия их взаимодействия. Механизм мостиковой флокуляции заключается в том, что макромолекулы флокулянтов притягиваются поверхностью частиц твердой фазы посредством молекулярных, гидрофобных, а в ряде случаев электростатических сил. Дальнейшее образование связей между частицами за счет мостиков из макромолекул приводит к агрегированию частиц с образованием структурированных систем — флокуляционных структур (ФС). Это значительно ускоряет процессы разделения суспензий седиментацией, фильтрованием и центрифугированием. В то же время ФС характеризуются сравнительно невысокой прочностью. В результате при течении суспензий как в ламинарном, так и в турбулентном неизоотропном режимах возникают сдвиговые усилия, обуславливающие разрушение ФС. Механизм этого явления более сложен по сравнению с разрушением коагуляционных структур, поскольку в данном случае имеет значение взаимодействие частиц, образующих структуру, не только между собой, но и с макромолекулами полимера.

В [1] введено понятие предела прочности флокулы:

$$P = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

где σ — эффективное поверхностное натяжение на границе раздела “флокула – дисперсионная среда”; r — радиус флокулы.

Условие начала разрушения флокулы заключается в том, что разность динамических давлений должна стать равной величине P :

$$\kappa \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) = \frac{2\sigma}{r}, \quad (2)$$

здесь κ — коэффициент, зависящий от характера обтекания флокулы дисперсионной средой; ρ — плотность дисперсионной среды; v_1, v_2 — скорости дисперсионной среды в точках, удаленных друг от друга на расстояние r .

Рассмотренный подход позволяет определить расчетным путем значения гидродинамических параметров, при которых начинается деструкция флокул. Однако входящая в расчетное уравнение величина σ может быть получена только экспериментальным путем; ее связь с физико-химическими характеристиками флокулы неясна.

В [2] показано, что в процессе течения суспензии под действием простого сдвига флокулы при столкновении начинают вращаться вокруг общего центра, причем каждые четверть периода вращения вязкие силы то прижимают, то отрывают частицы друг от друга. Происходит распад флокул на относительно крупные фрагменты, которые могут рекомбинироваться. Условие прочности флокулы выражается следующим образом:

$$[D_F]_{\max} = \frac{6(1-\varepsilon)^{\frac{2}{3}}}{\pi^2 K \sqrt{\omega \rho}} \ddot{U}, \quad (3)$$

где $[D_F]_{\max}$ — максимальный (критический) диаметр флокул; ε — пористость флокул; K — коэффициент, характеризующий долю энергии, расходуемую на разрыв парных связей между частицами; ω — диссипация механической энергии внутри флокулы; \ddot{U} — удельная парная энергия связи.

Использование данной модели для практических расчетов сложно в связи с тем, что входящие в выражение (3) величины K и \dot{U} трудно поддаются определению. Анализ причин и механизма деструкции флокул содержится в [3, 4]. Согласно [3], наиболее вероятной причиной является разрыв водородных связей между макромолекулами полимера и функциональными группами поверхности частиц твердой фазы. Утверждается, что деструкция вследствие разрыва углерод-углеродных связей в макромолекуле исключена по причине высокой прочности этой связи по сравнению с водородной.

Существуют следующие механизмы сдвиговой деструкции флокул: растяжение с образованием сравнительно крупных фрагментов; поверхностная эрозия, заключающаяся в отрыве от поверхности флокулы отдельных частиц [4]. В [5] изложена и экспериментально проверена следующая концепция: разрушение флокул обусловлено растяжением, вызванным сдвиговыми действиями с напряжением τ при течении суспензии в неизотропном турбулентном режиме. Причем флокула в потоке сначала растягивается по направлению действия силы сдвига, а затем разрушается на сравнительно крупные фрагменты (но не на индивидуальные частицы). Также сформулировано условие прочности флокул:

$$\frac{\rho u^2}{2} \leq \tau_Y, \quad (4)$$

где τ_Y — предельное динамическое напряжение сдвига; u — скорость пульсаций.

Величина τ_Y является характеристикой прочности флокул и зависит от сил взаимодействия между частицами, а также частиц с макромолекулами флокулянта. В [6] на примере водных суспензий Na-монтмориллонита показано, что в отсутствие флокулянтов значение τ_Y очень мало — не более 0.04 Па. С применением анионоактивных полиакриламидных флокулянтов при наличии NaCl с концентрацией 0.1 моль/л τ_Y составила 0.5–4.4 Па, при этом суспензия приобретает пластичные или псевдопластичные свойства.

Силы взаимодействия полимеров с поверхностью твердой фазы определяют методом атомно-силовой микроскопии по специальной методике, основанной на прикреплении индивидуальных макромолекул к зонду микроскопа и к исследуемой поверхности. Данные, приведенные в [7–9], свидетельствуют о том, что при увеличении расстояния между зондом и поверхностью мостиковая связь посредством макромолекулы сохраняется. Однако сила притяжения этих объектов уменьшается, но не непрерывно, а скачкообразно. Это дает основание полагать, что происходит последовательный отрыв отдельных макромолекул от поверхности (рис. 1).

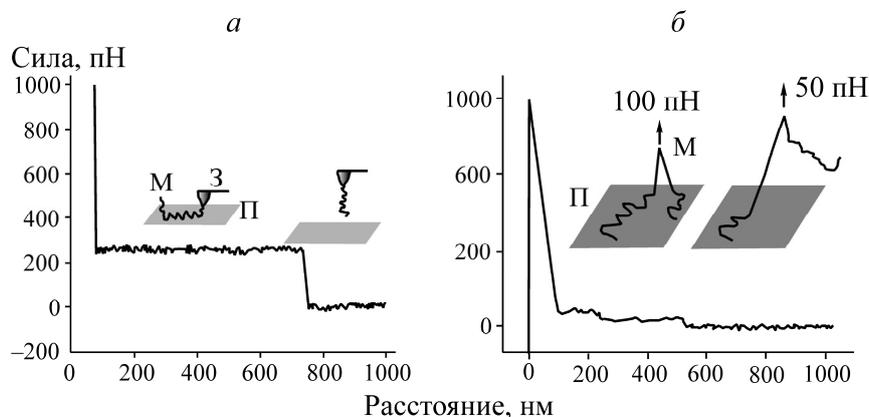


Рис. 1. Динамика взаимодействия полимера с поверхностью твердой фазы: М — макромолекула; З — зонд; П — поверхность; а — согласно [9]; б — согласно [7]

В [10] прочность флокуляционных структур определена на основании теоретического анализа состояния предельного напряжения при сдвиге, характеризующегося тем, что количество точек контакта каждой из макромолекул полимера с частицей равно 1. Показано, что с увеличением диаметра частиц δ значение τ_Y монотонно убывает, при $\delta > 10-15$ мкм становится практически постоянным и зависит только от расхода флокулянта q . Характер данной зависимости прямой: при изменении q в пределах 50–300 г/т значение τ_Y возрастает от 0.5 до 3.0 Па. Расчетные значения подтверждены экспериментальными результатами исследований реологических характеристик суспензий угольного флотационного концентрата с применением флокулянта. В то же время неясно, как взаимосвязаны гидродинамические параметры течения суспензий и прочность ФС.

Для определения прочности флокуляционных структур выполнен анализ взаимодействия силы полимера и поверхности. Установлено, что среднее значение силы притяжения заряженных групп макромолекулы флокулянта и поверхности угольных частиц f , оцененное на основании данных, приведенных в [11], составляет 1.5 пН. Согласно [10], в состоянии предельного напряжения при сдвиге количество точек контакта с поверхностью отдельной частицы для каждой из макромолекул флокулянта, входящих в состав структуры, уменьшается до 1, а значение угла сдвига θ приближается к 90° (рис. 2). В соответствии с [12], количество макромолекул полимера n на одну частицу диаметром δ равно

$$n = 10^{-3} \frac{\pi}{6} q C_T N_A \frac{1}{M} (6\delta^2 d + 12\delta d^2 + 8d^3), \quad (5)$$

где q — расход флокулянта, г/т; C_T — содержание твердой фазы в суспензии, кг/м³; d — диаметр статистического клубка макромолекулы флокулянта, м; $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль — число Авогадро; M — молекулярная масса флокулянта, кг/кмоль.

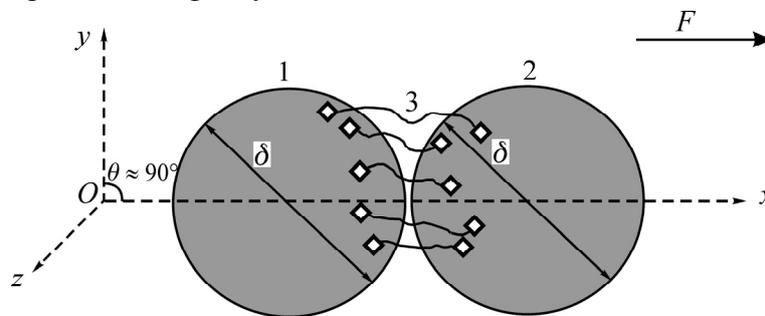


Рис. 2. Расположение соседних частиц флокуляционных структур в состоянии предельного напряжения при сдвиге: 1, 2 — частицы диаметром δ ; 3 — макромолекулы флокулянта; F — сила сдвига; θ — угол сдвига; \blacklozenge — точка контакта макромолекулы с поверхностью частицы

В состоянии предельного напряжения при сдвиге прочность структуры (рис. 2) определяется количеством макромолекул \tilde{n} , обращенных в сторону соседней частицы; в данном случае от 2 к 1. Принимаем $\tilde{n} \approx 0.5n$. Значение площади проекции S системы из частиц 1 и 2 на плоскость xOz приближенно равно $0.5\pi\delta^2$. Следовательно, предельное динамическое напряжение сдвига τ_Y запишется следующим образом:

$$\tau_Y = \frac{\tilde{n}f}{S} = 10^{-3} \frac{q C_T N_A}{6} \frac{2(6\delta^2 d + 12\delta d^2 + 8d^3)f}{M \delta^2}. \quad (6)$$

Анализ (6) позволяет сделать следующие выводы: зависимость τ_Y от диаметра частиц δ является монотонно убывающей с горизонтальной асимптотой, причем с увеличением δ свыше 10 мкм значение τ_Y практически не изменяется; величина τ_Y возрастает прямо пропорционально расходу флокулянта.

Для определения условий, обеспечивающих сохранность флокуляционных структур при транспортировании по трубопроводам, в настоящей работе режим поступательного движения суспензий, согласно [4, 5], рассматривается как развитый турбулентный неизотропный. Предполагается, что разрушение флокуляционных структур происходит в ядре потока вихрями, масштаб которых сопоставим с диаметром флокул. Исходя из неравенства (4), а также учитывая известные соотношения для расчета скорости пульсаций при поступательном движении потока суспензии с линейной скоростью v_0 по трубопроводу с диаметром D [13], находим условие прочности флокуляционных структур:

$$v_0 \leq 20.65 \rho^{\frac{3}{7}} \tau_Y^{\frac{4}{7}} \frac{\mu^{-\frac{1}{7}}}{D}. \quad (7)$$

Уравнение (7) дает возможность решить следующие задачи по расчету параметров транспортирования суспензий для обеспечения сохранения ФС:

- определение минимального допустимого значения диаметра трубопровода D при заданном объемном расходе суспензии;
- вычисление максимальной допустимой скорости потока суспензии при заданном D ;
- определение минимального расхода флокулянта, необходимого для обеспечения прочности флокуляционных структур, при известных значениях v_0 и D .

На рис. 3, 4 представлены результаты численного моделирования по установлению взаимосвязи максимального допустимого значения скорости потока, диаметра трубопровода и расхода флокулянта. Расчеты выполнены для угольного флотационного концентрата со средневзвешенным диаметром частиц порядка 33 мкм, содержанием твердой фазы 200 кг/м³; рассматривался анионоактивный флокулянт с молекулярной массой $1.5 \cdot 10^7$ кг/кмоль.

Данные, приведенные на рис. 3а, получены для диаметров трубопроводов, применяемых на углеобогащительных фабриках (0.2–0.6 м), а также значений q в пределах, обусловленных существующими технологиями флокуляции угольных концентратов и шламов. Расчетные значения v_0 находятся в пределах 1.0–4.2 м/с, что не противоречит рекомендуемым скоростям течения суспензий в напорных трубопроводах (1.5–3.0 м/с).

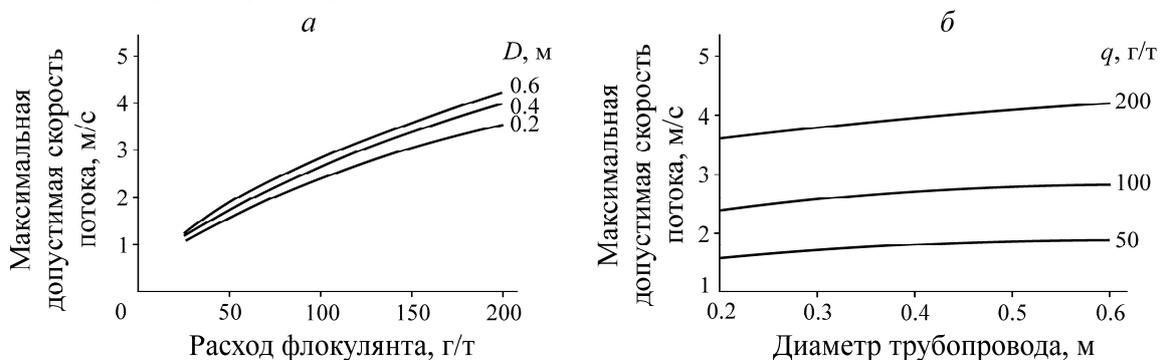


Рис. 3. Зависимость максимальной допустимой скорости потока угольного флотационного концентрата при различных значениях: а — диаметра трубопровода D ; б — расхода флокулянта q

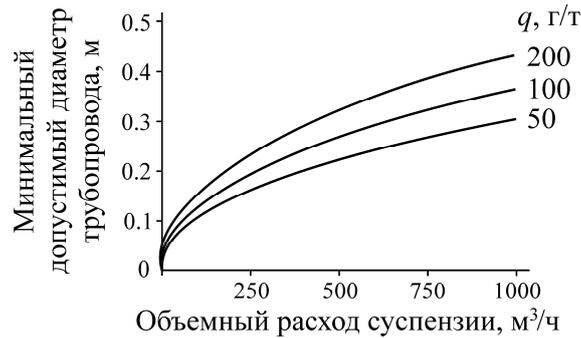


Рис. 4. Зависимость минимального допустимого диаметра трубопровода от объемного расхода суспензии при различных значениях расхода флокулянта q

Из рис. 3б следует, что при постоянном значении q с увеличением диаметра от 0.2 до 0.6 м скорость потока v_0 возрастает на 16% и равна ~1.8 м/с для расхода флокулянта 50 г/т, а для расходов 100 и 200 г/т — соответственно 2.6 и 3.9 м/с.

Данные на рис. 4 позволяют определить минимальное допустимое значение диаметра трубопровода при известных q и объемном расходе суспензии G . Полученные расчетные значения D для наиболее характерных расходах G составили 0.1–0.4 м. Это согласуется с известными данными по диаметрам трубопроводов, применяемых на обогатительных фабриках. При прочих равных условиях повышение расхода флокулянта в 2 раза обуславливает уменьшение диаметра в среднем на 20%. С увеличением расхода суспензии G от 100 до 1000 м³/ч диаметр трубопровода возрастает в 3 раза.

Значения критерия Рейнольдса Re для объемного расхода суспензии свыше 1 м³/ч составили не менее 10^4 , что свидетельствует о развитом турбулентном режиме при транспортировании суспензий в промышленных условиях. Данные предварительных расчетов показали, что при этих условиях суммарный объем переходного и граничного слоев очень мал (не более 0.01% от объема ядра потока). Вопрос о критических значениях Re для псевдопластичных суспензий требует выполнения специальных исследований.

ВЫВОДЫ

Представлены уравнения, позволяющие определить гидродинамические параметры течения суспензий, обеспечивающие сохранность флокуляционных структур. На примере угольного флотационного концентрата со средневзвешенным диаметром частиц 33 мкм расчетным путем установлено: максимальная допустимая скорость потока суспензии при изменении расхода флокулянта от 25 до 200 г/т для трубопроводов диаметром 0.2–0.6 м равна 1.0–4.2 м/с; с увеличением объемного расхода суспензии от 100 до 1000 м³/ч при расходе флокулянта 50–200 г/т минимальное допустимое значение диаметра трубопровода изменяется в пределах от 0.1 до 0.4 м. Использование полученных данных возможно на стадии проектирования, реконструкции и эксплуатации обогатительных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борц М. А., Гупало Ю. П. Обезвоживание хвостов флотации угольных шламов. — М.: Недра, 1972. — 143 с.
2. Рулев Н. Н., Донцова Т. А., Небеснова Т. В. Парная энергия связи частиц и размер флокул, образующихся в турбулентном потоке // Химия и технология воды. — 2005. — Т. 27, № 1. — С. 21–37.

3. **Taylor M. L., Morris G. E., Self P. G., and Smart R. St. C.** Kinetics of adsorption of high molecular weight anionic polyacrylamide onto kaolinite: the flocculation process, *J. of Colloid and Interface Sci.*, 2002, Vol. 250, No. 1. — P. 28–36.
4. **Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., and Parsons S. A.** A Review of floc strength and breakage, *Water Research*, 2005, Vol. 39, No. 14. — P. 3121–3137.
5. **Liu S. X. and Glasgow L. A.** Aggregate disintegration in turbulent jets, *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, Vol. 95, No. 1–4. — P. 257–275.
6. **Heller H. and Keren R.** Anionic polyacrylamide polymers effect on rheological behavior of sodium-montmorillonite suspensions, *Soil Sci. Society of America J.*, 2002, Vol. 66, No. 1. — P. 19–25.
7. **Shuxun Cui, Chuanjun Liu, and Xi Zhang.** Simple method to isolate single polymer chains for the direct measurement of the desorption force, *Nano Letters*, 2003, Vol. 3, No. 2. — P. 245–248.
8. **Haschke H., Miles M. J., and Koutsos V.** Conformation of a single polyacrylamide molecule adsorbed onto a mica surface studied with atomic force microscopy, *Macromolecules*, 2004, Vol. 37, No. 10. — P. 3799–3803.
9. **Wei Sun, Jun Long, Zhenghe Xu, and Jacob H. Masliyah.** Study of $Al(OH)_3$ -polyacrylamide-induced pelleting flocculation by single molecule force spectroscopy, *Langmuir*, 2008, Vol. 24, No. 24. — P. 14015–14021.
10. **Вигдергауз В. Е., Гольберг Г. Ю.** Механическая деструкция флокуляционных структур под действием сдвига // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 139–146.
11. **Israelachvili J. N.** Intermolecular and surface forces. Second edition, London, Acad. Press, 1992. — 450 p.
12. **Рубинштейн Ю. Б., Яровая О. В., Гольберг Г. Ю., Новак В. И.** Обоснование применения полиакриламидных флокулянтов для селективного разделения угольных шламов // Изв. вузов. Горн. журн. — 2011. — № 2. — С. 97–102.
13. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматлит, 1959. — 700 с.

Поступила в редакцию 25/VI 2019

После доработки 24/V 2019

Принята к публикации 28/V 2019