

**Н.Н. РУЛЕВ, В.Я. КОРОЛЕВ, О.В. КРАВЧЕНКО**

(Украина, Киев, Институт биокolloидной химии им. Ф. Д. Овчаренко НАН Украины),

**В.В. ЛУКЬЯНОВА**

(Украина, Киев, Университет экономики и права "КРОК")

## **УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦИЯ – КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО УГЛЯ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Эффективное использование высокомолекулярных водорастворимых полимеров (флокулянтов) для сепарации и обезвоживания продуктов и отходов углеобогащения невозможно без оптимизации гидродинамического режима обработки флокулируемой суспензии. Теоретические и экспериментальные исследования в этой области, проведенные в последние два десятилетия [1-2], показали, что правильный выбор гидродинамического режима обработки суспензий позволяет существенно снизить расход флокулянта (на 50...70%), а также улучшить седиментационные и фильтрационные свойства флокул, что фактически равноценно увеличению производительности сгустителей и фильтров (в 1,5-2,5 раза). В настоящее время успешно развивается новое направление в обработке суспензий, получившее название "ультра-флокуляция" (УФК) [3-5]. Основное отличие УФК-технологии от обычной флокуляции состоит в том, что при УФК-обработке используются в 5-30 раз более неоднородные гидродинамические поля, что соответствует градиентам скорости среды  $G = 500...3000 \text{ с}^{-1}$ . Такой режим гидродинамической обработки позволяет за короткое время (5-7 с) не только осуществить равномерное распределение молекул высокомолекулярного флокулянта по объему суспензии и на поверхности флокулируемых частиц, но и сформировать большие и, что очень важно, плотные флокулы. Последнее, как известно, обеспечивает большую скорость седиментации твердого в сгустителях и водоотдачу осадка при фильтровании.

В данном докладе представлены результаты лабораторных исследований влияния ультра-флокулярной обработки на эффективность процесса извлечения тонкодисперсного угля из хвостов обогащения образующихся на ОФ "Распадская". Все эксперименты проводились с помощью оригинального прибора "УльтрафлокТестер-2007", разработанного фирмой "Турбофлотсервис", содержащего минифлокулятор, а также оптоэлектронную измерительную систему определения эффективности флокуляции по среднему размеру флокул и степени осветления воды. С помощью упомянутого прибора можно было не только определять оптимальный тип и дозировку флокулянта, но и оптимальный режим гидродинамической обработки конкретной суспензии. Все образцы отбирались из реальных потоков и исследовались в течение 30...40 минут. Согласно принятой на ОФ "Распадская" технологической схеме, извлечение тонкодисперсной фракции угля (-30 мкм) из хвостов обогащения осуществляется путем селективной флокуляции и седиментации в радиальном сгустителе (Ø 26 м).

## **Спеціальні та комбіновані методи**

Содержание твердой фазы в хвостах составляет  $c_0 = 23,1 \dots 25,4$  кг/м<sup>3</sup>, содержание угля в твердом – до 80 % зольность –  $A_0^d = 25,5\%$ , расход – 1320 м<sup>3</sup>/ч.

Для извлечения угля в виде сгущенного концентрата, в питание сгустителя подается раствор (0,2 %) высокомолекулярного флокулянта "Магнафлок 155" из расчета, примерно, 60...80 г/т твердого. За счет избирательного действия используемого флокулянта флокулируют преимущественно частички угля, которые, и оседают в сгустителе в виде сгущенного концентрата (зольность – 16...20 %), а слив с концентрацией твердого  $c_1 = 7,4$  кг/м<sup>3</sup> (зольность -  $A_1 = 45 \dots 50\%$ ) поступает на последующую обработку в качестве части питания радиального второго радиального сгустителя, где осуществляется сепарация отходов и осветление оборотной воды. Таким образом, первый сгуститель служит, по-существу, классификатором-сепаратором, в котором из хвостов углеобогащения извлекается дополнительный товарный продукт. Для оценки эффективности процесса можно использовать т. н. степень извлечения  $R$ , определяемую по формуле:

$$R = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta c(1-a) + c_1 A_1^d - c_0 A_0^d}{c_0(1+a-A_0^d)} \quad (1)$$

где:  $m$  - исходная концентрации угля в питании сгустителя,  $\Delta m$  - величина ее уменьшения за счет извлечения (оседания) в сгустителе,  $c_0$  - общая исходная концентрации твердого в питании,  $c_1$  - концентрация твердого в сливе,  $\Delta c = c_0 - c_1$  – величина ее уменьшения за счет отделения осадка,  $A_0^d$  и  $A_1^d$  зольность исходной взвеси и взвеси, содержащейся в сливе сгустителя,  $a$  – материнская зольность угля.

Полагая, что материнская зольность угля  $a$  составляет 6 %, после подстановки вышеприведенных данных относительно  $A_0^d$ ,  $A_1^d$ ,  $c_0$  и  $c_1$  в формулу (1) для степени извлечения, имеющей место на ОФ "Распадская", получим:  $R = 67,4 \dots 69,2\%$ . Если учесть, что питание сгустителя, рассчитано на поток 1320 м<sup>3</sup>/ч и содержит 18,6...20,4 кг/м<sup>3</sup> угля, простыми расчетами получим, что потери угля за 1 год могут составить 66,2...76,9 тыс. тонн, т.е. 0,88...1,03% от плановой добычи в 7,5 млн. тонн/год.

### *Эксперимент*

Для моделирования процесса ультрафлокуляции и последующего отделения угля седиментацией, исследуемые образцы хвостов обрабатывалось с помощью прибора "УльтрафлокТестер-2007" по схеме, приведенной на рис. 1. Образец суспензии смешивался с раствором флокулянта (Магнафлок 155) и непрерывно прокачивался через ультрафлокулятор, где он обрабатывался в течение 6 с. С выхода ультра-флокулятора образец подавался через оптический датчик в минисгуститель по выпускной трубке. Из минисгустителя, где осуществлялась гравитационная сепарация сфлокулированных частиц угля, суспензия переливалась в коллектор. Изменяя расход флокулянта можно было менять его

дозировку, а изменяя скорость вращения ротора ультрафлокулятора можно было менять интенсивность гидродинамической обработки (осредненный градиент скорости среды). С помощью оптического датчика измерялись флуктуации прозрачности потока суспензии и степень ее осветления. Сигнал от оптического датчика обрабатывался и высвечивался на цифровом табло прибора, показывая средний размер флокул, сформированных в ультрафлокуляторе, в относительных единицах. Осадок, собранный в минисгустителе после пропускания через прибор одного литра суспензии, отфильтровывался на сетке, высушивался и взвешивался. Затем определялась его зольность. Таким образом, можно было оценить, какая часть угля может быть извлечена из образца при данном режиме обработки. Изменяя диаметр минисгустителя, в качестве которого использовался стеклянный стаканчик, можно было менять скорость восходящего потока воды, выносившего флокулы угля и другие взвешенные частицы, скорость седиментации которых была меньше, чем у него. Таким образом, в одном эксперименте можно было не только оценить относительный размер флокул при данных условиях обработки, но и скорость осаждения сфлокулированных частиц.

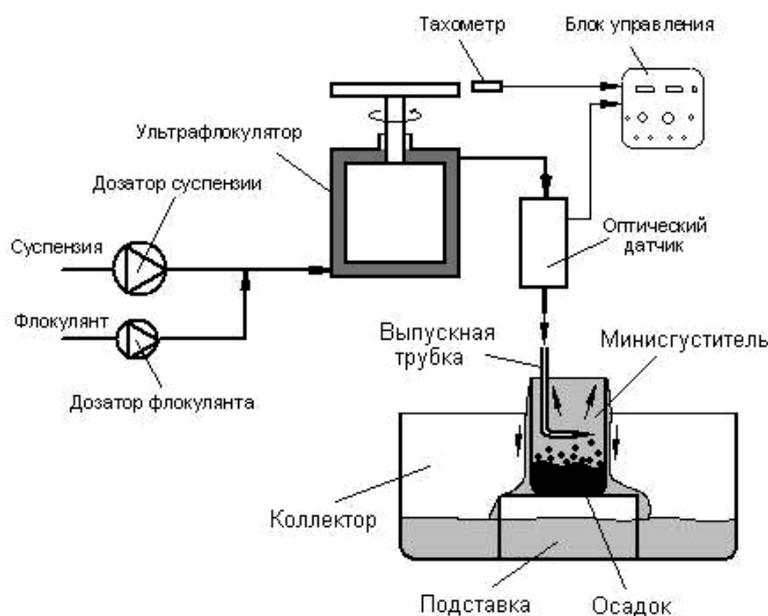


Рис. 1. Схема лабораторной обработки образцов питания сгустителя

### *Результаты и их обсуждение*

На рис. 2 представлены зависимости относительного размера флокул от дозировки различных флокулянтов производства фирмы "Сибя", образовавшихся после обработки образцов питания сгустителя в ультра-флокуляторе в течение 6 секунд при градиенте скорости среды, равном  $1600 \text{ с}^{-1}$ . Из приведенных графиков видно, что наиболее крупные флокулы образуются при использовании в качестве флокулянта "Магнафлок 155" (M155). Из Рис.2 также видно, что максимальное значение размера флокул при использовании флокулянта M155 достигается при дозировках, равных, примерно, 20 г/т или чуть выше.

## Спеціальні та комбіновані методи

Приведенные данные относительно размера флокул хорошо согласуются также с данными по степени осветления, представленными на Рис. 3 откуда видно, что флокулянт М155 дает значительно более высокую степень осветления, чем другие флокулянты. Последнее свидетельствует о том, что флокулянт М155 обеспечивает более полное агрегирование частиц угля во флокулы, чем другие флокулянты.

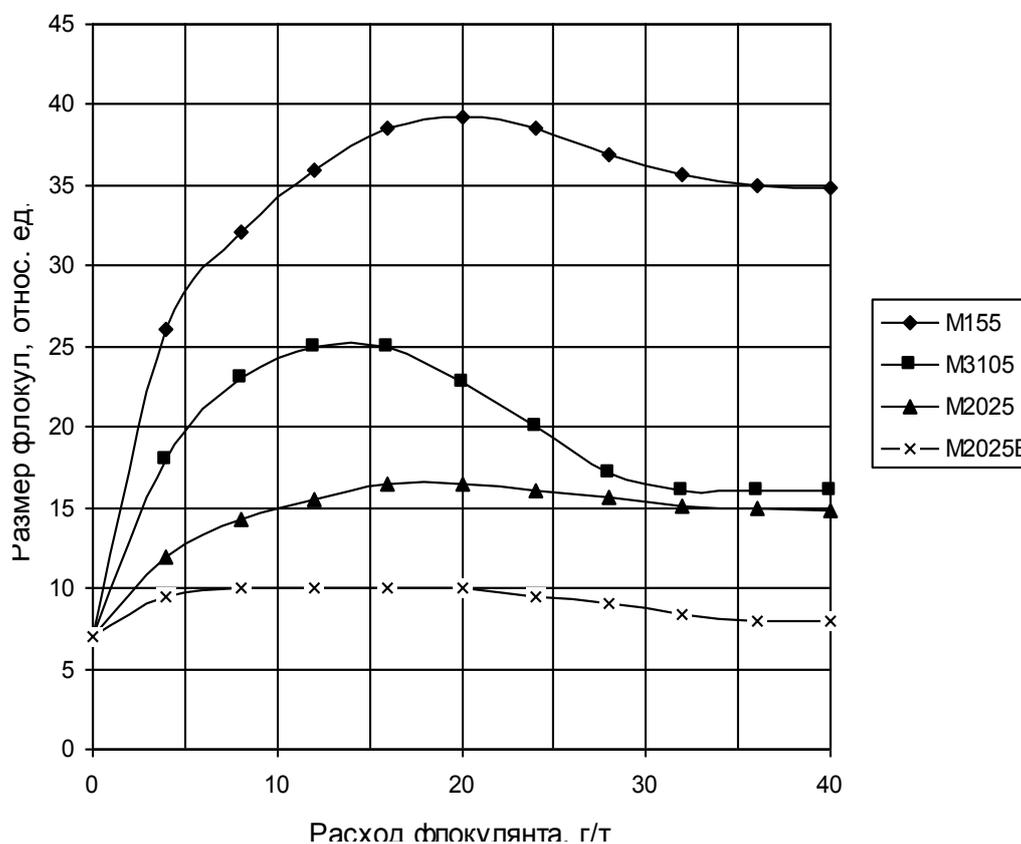


Рис. 2. Зависимость размера флокул в относительных единицах от дозировки различных флокулянтов производства фирмы "Сиб": Магнафлок-155, 3105, 2025, 2025В. Время обработки в ультра-флокуляторе – 6 секунд. Градиент скорости среды –  $1600 \text{ с}^{-1}$ . Концентрация суспензии – 25 г/л, зольность – 36%

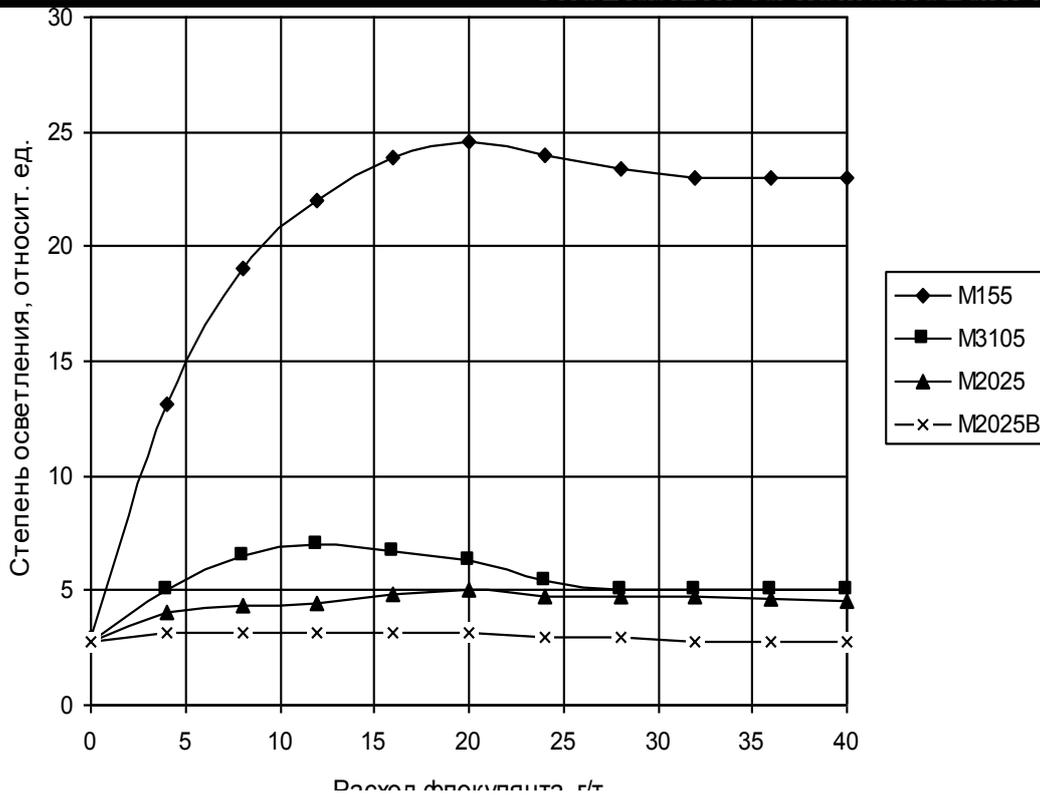


Рис. 3. Залежність ступеня освітлення суспензії від дозировки різних флокулянтів виробництва фірми "Сіба":

Магнафлок – 155, 3105, 2025, 2025В.

Время оброботки в ультра-флокуляторе – 5 секунд. Градиент скорости среды –  $1600 \text{ с}^{-1}$ .

Концентрация суспензии – 25 г/л, зольность – 36%

На Рис. 4 представлена залежність відносного розміра флокул, формуваних в ультра-флокуляторе при використанні флокулянта M155, від середнього градиента скорости среды во флокуляторе. Из приведенных данных следует, что оптимальному режиму гидродинамической оброботки соответствует градиент скорости среды, равный  $930 \text{ с}^{-1}$ . Следует особо отметить, что при градиентах порядка  $300 \text{ с}^{-1}$  размер флокул примерно вдвое меньше. Что же касается градиентов скорости среды, имеющих место в трубе, направляющей питание в сгуститель, то там он не превышает  $100 \text{ с}^{-1}$ .

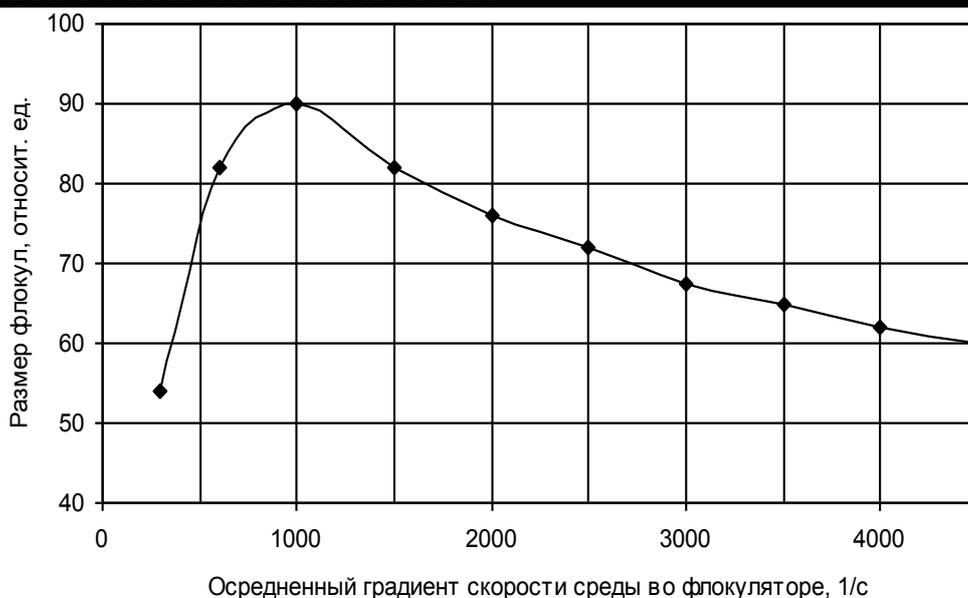


Рис. 4. Зависимость размера флокул в относительных единицах от градиента скорости среды:  
питание сгустителя: плотность – 22 г/л, зольность – 34%, флокулянт – М155 (40 г/т)

В таблице представлены данные относительно степени извлечения угольного концентрата в минисгустителе при оптимальном режиме гидродинамической обработки (6 секунд,  $G = 930 \text{ с}^{-1}$ ) и дозировке флокулянта М155 – 24 г/т.

Для сравнения там же представлены результаты сепарации образца питания сгустителя, который проходил гидродинамическую обработку не в ультрафлокуляторе, а в трубчатом статическом миксере (ПВХ- трубка:  $\varnothing 5$  мм, длина 50 см, время движения 12 с). В качестве минисгустителя использовались стаканчики различного сечения, скорости восходящих потоков в которых составляли: 0,37; 0,58 и 0,81 мм/с. Степень извлечения угля рассчитывалась по формуле (1) в которой полагалось, что  $a$  – материнская зольность угля, примерно равна 0,06.

Из приведенных в таблице данных следует, что использование ультрафлокулярной обработки в течение 6 секунд при дозе флокулянта 24 г/т (т.е. в 2,3...3,4 раза меньше, чем та, что применяется на ОФ "Распадская") из хвостов удается извлечь, примерно, 83...85% угля. При этом зольность концентрата почти в 1,43...1,79 раза меньше, чем та, что реально достигается на ОФ "Распадская".

Из таблицы также следует, что скорость седиментации флокул угля значительно больше, чем 0,8 мм/с, что позволяет вместо огромного радиального сгустителя площадью  $500 \text{ м}^2$  использовать относительно небольшой ламелярный сгуститель, занимающий площадь, равную, примерно,  $30 \text{ м}^2$ .

Значительно больший экономический эффект можно получить от дополнительного извлечения угля. Поскольку использование ультрафлокулярной технологии позволяет извлекать из хвостов до 85,6% угля (см. таблицу). Очевидно, что при увеличении объема перерабатываемых хвостов доход от использования УФК-технологии пропорционально возрастет.

## Спеціальні та комбіновані методи

Зависимость эффективности флокуляционно-седиментационного извлечения угля от скорости противотока среды (характеристической скорости проточного вертикального минисгустителя).

Скорость противотока, мм/с	0,37	0,58	0,81
УФК-обработка:			
Плотность осадка, г/л /зольность, %	15 / 11,2	15,4 / 11,4	15,2 / 11,9
Извлечение, %	83,6	85,6	84,1
Обработка в трубчатом миксере:			
Плотность осадка, г/л /зольность, %	11,2 / 11,4	8,8 / 9,1	6,8 / 9,9
Извлечение, % (при $\alpha = 6\%$ )	62,3	50,2	38,5

Образец: Плотность – 25 г/л. Входная зольность – 36,3 %. Расход флокулянта – 24 г/т. Время обработки во флокуляторе – 6 с, градиент скорости среды –  $930 \text{ с}^{-1}$ . Количество обработанной суспензии – 1 л при каждом измерении. Условия обработки в статическом миксере: ПВХ – трубка:  $\varnothing 5 \text{ мм}$ , длина 50 см, время движения 12 с. Материнская зольность – 6%

### Выводы

На основании вышеприведенных результатов исследования можно заключить, что использование ультрафлокуляционной обработки дает нижеследующие преимущества при извлечении тонкодисперсного угля методом седиментации в радиальном сгустителе:

- Снижение расхода флокулянтов – в 2,5...3,5 раза.
- Увеличение извлечения угольного концентрата из хвостов на 23...26%.
- Уменьшение зольности концентрата, извлекаемого из хвостов с 18 до 12%.
- Уменьшение влажности пресс-фильтрационного кека концентрата, извлекаемого из хвостов с 40 до 35%.

### Список литературы

1. **Rulyov N.N.** Application of ultra-flocculation and turbulent micro-flotation to the removal of fine contaminants from water // *Colloids & Surfaces A.* – 1999. – V.151. – P. 283–291.
2. **Rulyov N.N.** Hydrodynamic destruction of waste emulsions in the process of their separation through ultra-flocculation and micro-flotation // *Colloids & Surfaces A.*–1999.–V.152. – P. 11–15.
3. **Rulyov N.N.** Ultra-flocculation: Theory, Experiment, Applications // In book "Particle Size Enlargement in Mineral Processing". – Montreal (Canada). – 2004. – P. 197–214.
4. **Rulyov N.N., Dontsova T.A., Korolyov V.Ja.** Ultra-flocculation of diluted fine disperse suspensions // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* – 2005. – V. 26, № 3–4. – P. 203–217.
5. **Rulyov N.N., Korolyov B.Y., Kovalchuk N.M.** Application of the ultra-flocculation for improvements of fine coal concentrate dewatering // *Coal Preparation.* – 2006. – V.26. – P. 17–32.

© Рулев Н.Н., Королев В.Я., Кравченко О.В., Лукьянова В.В., 2010

*Надійшла до редколегії 21.02.2010 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*