

**Стрельникова Елена Александровна** – Доктор технических наук, Ведущий научный сотрудник по специальности механика деформируемого твердого тела, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

**Стрельникова Олена Олександрівна** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник зі спеціальності механіка деформованого твердого тіла, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

**Strelnikova Elena** – Doctor of Technical Sciences, Leading researcher in the specialty Fracture Mechanics, A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, vul. Pozharskoho, 2/10, Kharkiv, Ukraine 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

УДК 622.7

**А. А. ШКОП, М. А. ЦЕЙТЛИН, А. В. ШЕСТОПАЛОВ**

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОСЕДАНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Исследована кинетика оседания проб шлама различной концентрации и дисперсного состава. Определено, что скорость осаждения частиц твердой фазы шлама снижается при повышении ее концентрации и увеличении доли мелкодисперсной фракции. Присутствие фракции размером более 40 мкм в шламе снижает расход флокулянта в несколько раз и интенсифицирует процесс флокулообразования. Установлено, что для достижения одинаковых скоростей оседания для различных по дисперсному составу или концентрации твердой фазы суспензий требуется разное количество флокулянта. Наилучшие результаты по флокуляции с минимальным расходом полимера получены при более низких концентрациях твердой фазы.

**Ключевые слова:** флокуляция, полидисперсные шламы, дисперсный состав, экономия флокулянта, скорость осаждения, интенсификация.

Досліджено кінетику осідання проб шламу різної концентрації і дисперсного складу. Визначено, що швидкість осідання часток твердої фази шламу знижується при підвищенні їх концентрації і збільшенні вмісту дрібнодисперсної фракції. Присутність фракції розміром більше 40 мкм в шламі знижує витрату флокулянта у декілька разів і інтенсифікує процес флокулоутворення. Встановлено, що для досягнення однакових швидкостей осідання для різних за дисперсним складом або концентрацією твердої фази суспензій потрібна різна кількість флокулянта. Найкращі результати з флокуляції з мінімальною витратою полімеру отримані при нижчих концентраціях твердої фази.

**Ключові слова:** флокуляція, полідисперсні шлами, дисперсний склад, економія флокулянта, швидкість осадження, інтенсифікація.

The article deals with the problems of flocculation intensification of coal sludge polydisperse suspensions. The sedimentation kinetics of sludge samples with different concentration and composition of the fine fractions are investigated. It is determined that the deposition rate of solid phase of sludge particles is reduced by increasing its concentration and increasing the proportion of finely-divided particles in the process of sedimentation and with the use of flocculants. It is established that different amount of flocculant is necessary to achieve the same sedimentation rate for suspensions with various particulate composition or concentration of the solid phase. It is found that polymer consumption increases with increase of solid phase concentration. The presence of the fraction larger than 40 microns in the sludge reduces flocculant consumption several times and intensifies the formation of large aggregates. The best results for flocculation with minimal polymer consumption are obtained with lower concentrations of solid phase. It is shown that the promising areas for intensification of flocculation process and reducing the polymer consumption are sludge adjustment in concentration and disperse composition by dilution to the optimum concentration of solid phase or addition of the fraction larger than 40 microns.

**Keywords:** flocculation, polydisperse sludge, disperse composition, flocculant savings, deposition rate, intensification.

### Введение

В результате интенсивной промышленной деятельности на многих предприятиях химической отрасли Украины накопилось огромное количество отходов, в частности шламов. Последние на протяжении длительного времени складываются в открытых шламонакопителях. В отдельных отраслях промышленности накоплено такое огромное количество промышленных отходов, что вопросы их хранения и последующей утилизации превратились в серьезные экономические и экологические проблемы.

Твердая фаза шламов углеобогатительных фабрик часто является ценным минеральным сырьем, а жидкую фазу целесообразно использовать в замкнутой системе оборотного водоснабжения. Многими странами (включая Украину) уже разработаны и внедрены локальные системы очистки химически загрязненных сточных вод с целью создания замкнутой системы водно-шламового хозяйства [1]. Современные технологические схемы включают различные методы очистки образованных на производстве сточных вод от взвешенных частиц и использования основных объемов очищенных вод в производственных нуждах.

В результате сгущения и осветления шламов в радиальных сгустителях и отстойниках различных конструкций получают оборотную воду и сгущенный продукт, направляемый на переработку или в шламонакопитель. От качества разделения суспензии в сгустителе зависят эффективность операций обогащения и снижение потерь воды фабрики. Поэтому замкнутый цикл, применяемый в углеобогатении, представляет особые требования к качеству разделения твердой и жидкой фаз в сгустителе [2].

В сложившейся практике частицы крупностью более 50 мкм в основном улавливаются в гравитационных отстойниках без использования реагентов, а частицы 10 – 50 мкм – в аналогичных аппаратах с использованием реагентов. Для обезвоживания полидисперсных суспензий крупностью до 0,5 мм используются дисковые вакуум-фильтры, камерные и ленточные фильтр-прессы, центрифуги и другое оборудование [3]. На всех этапах сгущения и обезвоживания проводится интенсификация процессов за счет использования значительного количества полимерных флокулянтов общим расходом 350 – 500 г/т и более.

© А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопалов. 2016

Поэтому одним из важных аспектов улучшения экономических показателей процесса сгущения является снижение расхода дорогостоящего флокулянта, используемого для интенсификации процесса осветления воды.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Явление агрегации твердой фазы высокодисперсных суспензий с применением полимерных флокулянтов широко используется в практике очистки сточных вод природного [4] и промышленного происхождения [5], в том числе и шламов и илов углеобогачительных фабрик [6].

Практика очистки шламов с использованием флокулянтов сводится к подбору нужного вида полимера (неионогенного или ионогенного) и его дозировки для получения требуемого эффекта.

Согласно теоретическим представлениям [7] процесс флокуляции проходит в две стадии: адсорбция флокулянта на поверхности частиц и образования флокул, которые отличаются по своей природе и требуют различных условий смешения и интенсификации процесса. Кинетика адсорбции флокулянта определяется [8] временем диффузии макромолекул к поверхности частиц (от нескольких десятков секунд до нескольких минут) и как время достижения равновесного состояния адсорбированных макромолекул флокулянта на частицах. Время диффузии флокулянта к частице зависит от концентрации твердой фазы в обрабатываемых водах, продолжительности и интенсивности перемешивания, вязкости жидкой фазы, концентрации и молекулярной массы флокулянта, температуры, pH и др. Так, например, авторами [9] установлено, что с увеличением расхода анионоактивного флокулянта от 25 до 250 г/т предельное динамическое напряжение сдвига, характеризующее прочность агрегатов, для флокуляционных структур угольных частиц возрастает от 0,5 до 3,0 Па [9].

Многообразие факторов, влияющих на процесс флокуляции, приводит к увеличению его дозировки, вместо оптимизации самого процесса, например, стадий адсорбции полимера на поверхности частиц и образования прочных агрегатов. Как отмечается в [10] до настоящего времени не решена задача оптимизации расхода флокулянтов и нет четко разработанных принципов управления процессом флокуляции.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований процесса флокуляции полидисперсных суспензий позволит обосновать способы управления процессом флокуляции и создать предпосылки для решения задачи по оптимизации расхода флокулянтов.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является изучение кинетики оседания твердой фазы шламов полидисперсного состава.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование кинетики оседания твердой фазы угольного шлама различного дисперсного состава и концентрации в поле гравитационных сил без применения флокулянтов.

2. Исследование кинетики оседания твердой фазы шлама различного дисперсного состава и концентрации с применением флокулянта.

3. Изучение зависимости расхода флокулянта от концентрации и состава шлама для достижения определенного значения скорости осветления суспензии.

4. Поиск путей интенсификации процесса агрегатообразования с целью снижения расхода флокулянта.

**Материалы и методы исследования кинетики твердой фазы полидисперсных суспензий.** Для лабораторных исследований кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий на одной из углеобогачительных фабрик были отобраны образцы шламов различного дисперсного состава. Использовались два образца шламовых вод: образец № 1 – шламовые воды от обмыва лент транспортеров после транспортировки размокшей породы в бункеры сбора породы с содержанием твердого  $C = 121,86$  г/л; образец № 2 – сгущенный продукт последней батареи гидроциклонов водношламовой схемы обогащения фабрики с содержанием твердого  $C = 128,49$  г/л.

Для каждого из образцов определяли гранулометрический состав и распределение массы шлама по классам с использованием виброанализатора ВА-В01 по методике ГОСТ 27707.

Каждый из образцов был разделен на три части и каждая часть пробы методом разбавления была доведена до концентраций твердой фазы 60, 70 и 80 г/л соответственно.

Были проведены следующие исследования:

1) определение кинетики осаждения твердой фазы для образцов №1 и №2 при  $C = 60$  г/л,  $C = 70$  г/л  $C = 80$  г/л без каких либо воздействий на пробы (отстаивание);

2) определение кинетики осаждения твердого для образцов №1 и №2 при  $C=60$  г/л,  $C=70$  г/л  $C=80$  г/л с последующем введением анионоактивного флокулянта Esofloc A-19 различной дозировки.

Процесс осаждения в естественных условиях (без добавления флокулянта) проводили в мерных цилиндрах объемом 500 мл в течении двух часов с регистрацией уровня осветленной жидкости каждые 10 минут.

При исследовании кинетики осаждения с флокуляцией шлам взмучивали, дозировали флокулянт, плотно закрывали и перемешивали двенадцатикратным опрокидыванием мерного цилиндра. Для каждого образца шлама дозировку флокулянта пересчитывали на его массовый расход (в граммах) на единицу массы твердой фазы (в тоннах). Скорость осаждения флокул после агрегатообразования определяли в зоне свободного осаждения, которая соответствовала верхней трети высоты цилиндра.

**Результаты исследования кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий.** Гранулометрический состав твердой фазы образцов шлама обогащательной фабрики и зольность каждого класса представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что образец шлама №1 более чем на 90 % состоит из мелкодисперсных частиц твердой фазы (класс менее 40 мкм), отличающийся высокой зольностью (преимущественно глинистые частицы). Образец шлама №2 содержит 22 % частиц твердой фазы размером более 40 мкм.

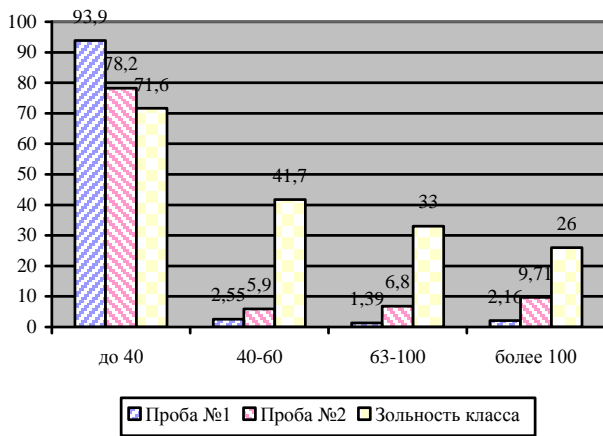


Рис. 1 – Гранулометрический состав твердой фазы образцов, %: проба №1 – смыв с лент породных конвейеров (зольность  $\approx 80\%$ ,  $pH=7,3$ ), проба №2 – сгущенный шлам схемы обогащения фабрики (зольность  $\approx 72\%$ ,  $pH=6,91$ )

Исследование кинетики осаждения в поле гравитационных сил (рис. 2) показало, что скорость оседания твердых частиц шлама при различных исходных концентрациях обоих образцов уменьшилась с ростом концентрации твердой фазы, что соответствует классическим представлениям о стесненном осаждении.

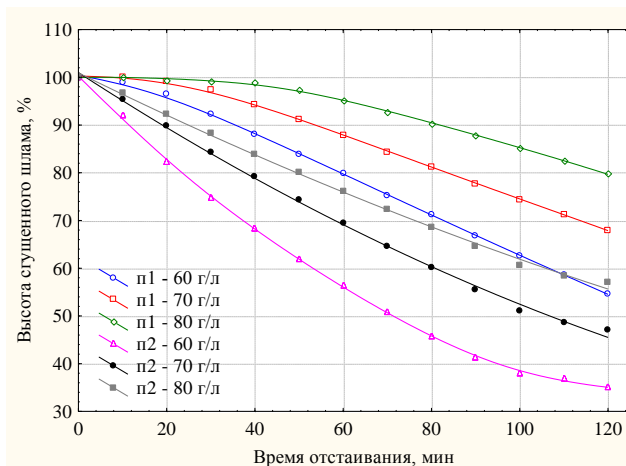


Рис. 2 – Кинетика осаждения образцов шлама: п1 – проба шлама №1; п2 – проба шлама №2.

Анализ данных для проб шлама №1 и №2 показывает также, что скорость осаждения частиц шлама зависит от дисперсного состава. Чем меньше частицы дисперсной фазы (проба №1), тем меньше их скорость осаждения, что также соответствует классическим представлениям теории осаждения и описывается уравнением

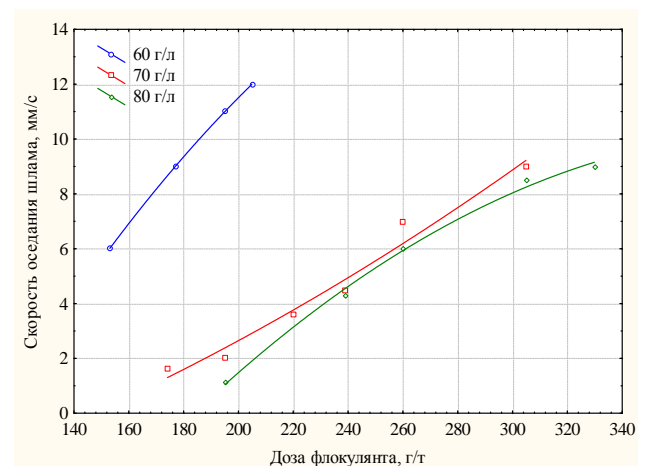
$$v = \frac{2g(\rho_T - \rho_P)}{9\mu} R^2, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость седиментации;  $\mu$  – вязкость дисперсной среды;  $g = 9,81\text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

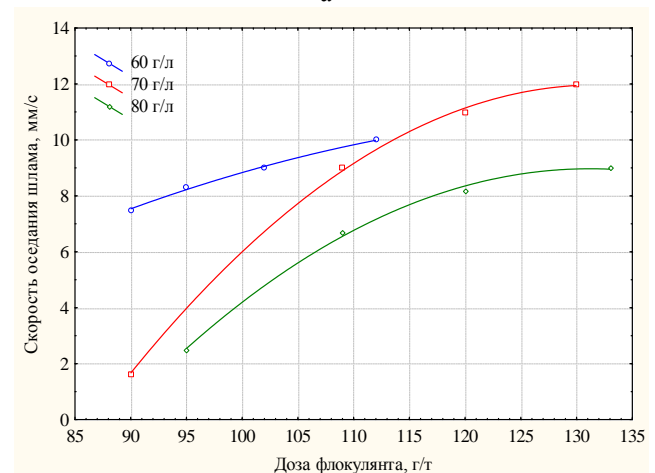
Из уравнения (1) вытекает, что с уменьшением размера частиц и приближением их к ультратонкой

фракции увеличивается влияние вязкости и плотности дисперсной фазы, а с ними и факторов устойчивости дисперсной системы. И наоборот, при увеличении размера частиц скорость седиментации приблизительно равняется  $R^2$ . Именно поэтому чаще всего интенсификация процесса осаждения полидисперсных суспензий, которые содержат тонкие фракции, осуществляется путем агрегации мелкодисперсных частиц, например, с помощью флокулянтов. В процессе образования флокул происходит усреднение размера агрегатов, так как основная их масса (около 90 %) имеет приблизительно одинаковые размеры. Это позволяет превратить полидисперсную систему в монодисперсную и путем использования флокулянтов добиться одинаковой скорости осаждения различных по составу и концентрации суспензий.

Исследование процесса осаждения полидисперсных суспензий образцов шлама №1 и №2 с применением флокулянта представлено на рис. 3а и 3б.



а



б

Рис. 3 – Зависимость скорости осаждения флокул от дозы флокулянта для образцов шлама: а – проба шлама №1; б – проба шлама №2.

На них показана зависимость скорости оседания от концентрации флокулянта. С ростом концентрации флокулянта возрастает скорость оседания флокул, что говорит об их укрупнении (образовании флокул 2-го порядка). В то же время можно видеть, что расход флокулянта на единицу массы твердой фазы зависит

как от дисперсного состава шлама, так и от его концентрации.

Возрастание доли фракции твердой фазы размером менее 40 мкм требует большего расхода флокулянта, чем для осаждения суспензии с той же скоростью такой же концентрации, содержащей большую долю фракции +40 мкм.

Очевидно, это явление объясняется большей площадью поверхности раздела фаз мелкодисперсного шлама, требующей большего количества флокулянта для адсорбции на поверхности частиц. Кроме того, образовавшиеся агрегаты флокул мелкодисперсного шлама имеют меньшие размеры и для дальнейшего укрупнения до размеров, обладающих большей скоростью оседания (образования флокул 2-го порядка), требуется дополнительная доза полимера.

**Обсуждение результатов исследования кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий.** Сравнительная характеристика количества флокулянта, необходимого для достижения одной и той же скорости (9 мм/с), а следовательно, и одинакового размера агрегатов, наглядно представлена на рис. 4.

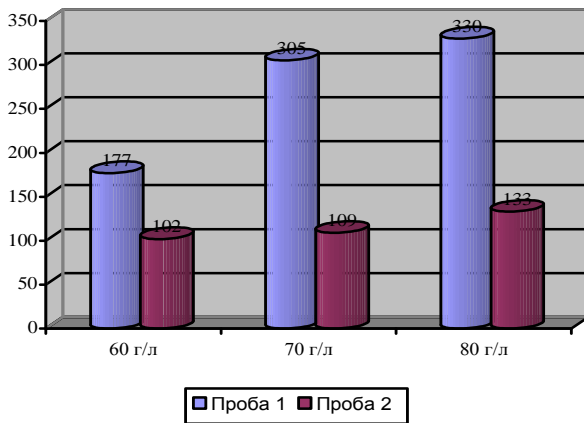


Рис. 4 – Сравнительная характеристика расхода флокулянта (г/т) для образцов шлама №1 и №2, необходимого для достижения скорости 9 мм/с

Анализ представленных на рис. 4 данных показывает, что для образования флокул с одинаковой скоростью оседания расход флокулянта для проб №1 и №2 может отличаться в 3 раза (например,  $C = 70$  г/л, средний столбец рис. 4), хотя доля фракции более 40 мкм в образцах шлама отличается всего на 15 % (согласно рис. 1). Такая непропорциональная зависимость может свидетельствовать о различии не только в размере флокул, но и структур агрегатов, образованных различными фракциями. Вероятно, более крупная фракция (более 40 мкм) активнее образует крупные агрегаты без дополнительного расхода флокулянта, выступая флокулообразователем и активно агрегируя мелкие частицы на своей поверхности.

Интерес вызывает тот факт, что с ростом концентрации твердой фазы одного и того же по дисперсному составу шлама (проба №1 или проба №2) так же увеличивается расход флокулянта в 1,5-2 раза для пробы №1 и примерно в 1,3 раза для пробы №2. Вероятно, при высокой концентрации твердой фазы процесс диффузии полимера в объеме затруднен и ад-

сорбция флокулянта на поверхности твердых частиц происходит неравномерно. В результате этого агрегаты образуются лишь из части твердой фазы.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о существовании оптимума для процесса флокуляции и агрегатообразования в зависимости от дисперсного состава и концентрации твердой фазы в суспензии. То есть, простым разбавлением исходного шлама до определенной концентрации можно сократить расход флокулянта в несколько раз (в пробе №1 при разбавлении твердой фазы с 80 до 60 г/л расход флокулянта для достижения скорости оседания 9 мм/с уменьшается почти в 2 раза). Другим путем интенсификации образования крупных агрегатов может быть корректировка дисперсного состава шлама, путем привнесения в него частиц более крупной дисперсной фазы вместо введения дополнительной дозы флокулянта.

Поиск путей оптимизации процесса флокуляции с целью снижения расхода дорогостоящих реагентов в зависимости от дисперсного состава и концентрации шлама является предметом наших дальнейших исследований.

**Выводы.** В ходе лабораторных исследований образцов шлама различного гранулометрического состава и концентрации было установлено:

1. Присутствие фракции размером более 40 мкм в количестве 22 % по массе в образце № 2 против 6,1 % аналогичной фракции в образце № 1 заметно увеличило скорость осаждения как твердой фазы без добавления флокулянтов, так и сфлокулированных агрегатов.

2. При одинаковой концентрации твердой фазы в отличающихся между собой лишь гранулометрическим составом образцах № 1 и № 2, доза полимера для достижения примерно одинаковой скорости осаждения отличается почти в три раза (при  $C = 80$  г/л и 70 г/л) и в 1,7 раз при  $C = 60$  г/л.

3. При одинаковом дисперсном составе шлама дозировка флокулянта существенно увеличивается с ростом концентрации твердой фазы в шламе (в 2 раза для пробы №1).

4. Перспективными направлениями интенсификации процесса флокуляции и уменьшения расхода полимера является корректировка шлама по концентрации и дисперсному составу путем разбавления до оптимальной концентрации твердой фазы или добавки фракции размером более 40 мкм.

#### Список литературы:

1. Пантелят, Г. С. Создание замкнутых систем оборотного водоснабжения на предприятиях черной металлургии [Текст] / Г. С. Пантелят, В. А. Андронов, Л. Н. Кузнецова, Д. А. Царенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 9. – С. 6–8.
2. Письменский, А. В. Метод автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации [Текст] / А. В. Письменский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5/6 (47). – С. 38–43. – Режим доступа: <http://www/URL: http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/3196/2999>
3. Шкоп, А. А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий [Текст] / А. А. Шкоп // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/6 (74) – С. 44–49. doi:10.15587/1729-4061.2015.40557

4. Радовенчик, Я. В. Освітлення природних вод з використанням флокулянтів [Текст] / Я. В. Радовенчик, А. О. Костриця, В. М. Радовенчик // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 4/6 (64). – С. 23–26. – Режим доступу: [http://www/URL:](http://www.URL:)  
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16696/14219>
5. Гомеля, М. Д. Відстоювання скопу з використанням флокулянтів різного типу [Текст] / М. Д. Гомеля, Я. В. Радовенчик, В. В. Тимошенко, О. С. Коваль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 1/6 (55). – С. 31–34. – Режим доступу: <http://www/URL:>  
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3396/3196>
6. Коновалова, Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углебогатительных фабрик [Текст] / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – № 1, Т. 3 (19). – С. 5–10.
7. Вейцер, Ю. И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод [Текст] / Ю. И. Вейцер, Д. М. Минц. – Москва: Стройиздат, 1984. – 201 с.
8. Баран, А. А. Полимеросодержащие дисперсные системы [Текст] / А. А. Баран. – Киев: Наукова думка, 1986. – 204 с.
9. Гольберг, Г. Ю. Образование, существование и разрушение флокуляционных структур [Текст] / Г. Ю. Гольберг, А. А. Лавриненко // Горный информационный бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 47–54.
10. Гольберг, Г. Ю. Физико-химические проблемы флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения углей [Текст] / Г. Ю. Гольберг // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 346–348.
1. Panteliat, H. S., Andronov, V. A., Kuznetsova, L. N., Tsarenko, D. A. (2005). Sozdanye zamknutykh system oborotnoho vodosnabzheniya na predpriyatiyakh chernoi metallurhyi. Vodosnabzheniye y sanitaraiia tekhnika, 9, 6–8.
2. Pysmenskyi, A. V. (2010). Metod avtomatycheskoho upravleniya protsessamy shushcheniya shlamovykh vod y osvetleniya otkhodov flotatsyy. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 5(6 (47)), 38–43. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/3196/2999>
3. Shkop, A. A. (2015). Dewatering coal polydisperse suspensions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(6(74)), 44–49. doi:[10.15587/1729-4061.2015.40557](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40557)
4. Radovenchyk, Ya. V., Kostrytsia, A. O., Radovenchyk, V. M. (2013). Osvitlennia pryrodnykh vod z vykorystanniam flokuliantiv. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 4(6(64)), 23–26. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16696/14219>
5. Homelia, M. D., Radovenchyk, Ya. V., Tymoshenko, V. V., Koval, O. S. (2012). Vidstoiuvannia skopu z vykorystanniam flokuliantiv riznoho typu. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(6(55)), 31–34. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3396/3196>
6. Konovalova, T. A., Veksler, G. B., Lavrinenko, A. A., Gol'berg, G. Yu. (2014). Primenenie flokulyantov dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti vodno-shlamovyih shem ugleobogatitelynyih fabric. Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta MAMI, 1(3(19)), 5–10.
7. Veitser, Yu. Y., Mynts, D. M. (1984). Vysokomolekuliarnye flokulianty v protsessakh ochistki prirodnykh i stochnykh vod. Moscow: Stroizdat, 200.
8. Baran, A. A. (1986). Polymersoderzhashchye dyspersnye systemy. Kyev: Naukova dumka, 204.
9. Golberg, G. Yu., Lavrinenko, A. A. (2015). Obrazovanie, suschestvo-vanie i razrushenie flokulyatsionnyih struktur. Mining Informational and Analytical Bulletin, 11, 47–54.
10. Golberg, G. Yu. (2006). Fyzyko-khymycheskye problemy flokuliiatsyy tonkodispersnykh produktov obohashcheniya uhlei. Mining Informational and Analytical Bulletin, 1, 346–348.

**Bibliography (transliterated):**

Поступила (received) 10.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження кінетики осідання твердої фази полідисперсних суспензій/ А. О. Шкоп, М. А. Цейтлін, О. В. Шестопалов**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.137–142. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Исследование кинетики оседания твердой фазы полидисперсных суспензий /А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопалов**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.137–142. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Researching settling of solid-phase particles kinetics in polydisperse suspensions/ A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 137–142. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шкоп Андрій Олександрович** – здобувач кафедри хімічної техніки і промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Цейтлін Мусій Абрамович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Шестопалов Олексій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khipi.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khipi.edu.ua).

**Шкоп Андрей Александрович** – соискатель кафедры химической техники и промышленной экологии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Цейтлин Мoiseй Абрамович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Шестопалов Алексей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khipi.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khipi.edu.ua).

**Shkop Andrii** – Applicant, Department of chemical technique and industrial ecology, National technical university «Kharkov polytechnic institute» 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Tseitlin Musii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National technical university «Kharkov polytechnic institute», 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Oleksii Shestopalov** – Candidate of engineering sciences, Associate professor, National technical university «Kharkov polytechnic institute», 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khp.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khp.edu.ua).

УДК 519.876.5::628.472.3

**В. Ю. КОЛОСКОВ**

## МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПОЛІГОНУ ЗІ ЗБЕРІГАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Вперше створено імітаційну модель системи управління безпекою полігону зі зберігання твердих побутових відходів. Під час розроблення моделі пропонується розглядати необхідні для визначення рівня безпеки параметри полігону, які визначають фактори ризику виникнення надзвичайних ситуацій на ньому, та показники якості довкілля як відгуки на вплив зовнішніх чинників. В цьому дослідженні показані й математично описані взаємозв'язки процесів, що відбуваються на об'єкті та у довкіллі. Основним результатом дослідження є удосконалення методу прогнозування рівня безпеки полігону шляхом використання імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** прогнозування, рівень безпеки, імітаційне моделювання, полігон, відходи, фактори ризику.

Впервые создана имитационная модель системы управления безопасностью полигона захоронения твердых бытовых отходов. При разработке моделью предлагается рассматривать необходимые для определения уровня безопасности параметры полигона, определяющие факторы риска возникновения на нем чрезвычайных ситуаций, и показатели качества окружающей среды, как отклики на воздействие внешних факторов. В данном исследовании показаны и математически описаны взаимосвязи процессов, происходящих на объекте и в окружающей среде. Основным результатом исследования является усовершенствование метода прогнозирования уровня безопасности полигона путем использования имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** прогнозирование, уровень безопасности, имитационное моделирование, полигон, отходы, факторы риска.

The purpose of the article is to develop method of forecasting of safety level of solid household wastes landfill based on simulation modeling application. The mathematical simulation of functioning process of safety control system of landfill is applied, taking into account interrelations of the processes taking place at the object and in the environment yet considering characteristics of these processes as responses of environment and object on influence of external factors. Results originality. For the first time, the mathematical model of functioning process of safety control system of landfill is developed. We have developed the improved method of forecasting of safety level of landfill is developed, allowing to account the whole complex of acting factors of negative influence of the landfill at the environment in connection with accompanying factors of risk of extreme situations occurrence and at the same time to decrease the number of meaning indexes of safety. Practical value. Application of the proposed method allows us to achieve stable and sufficiently accurate statistics of succession of events without experiments taken on real landfills, which may lead to extreme situations occurrence. It gives us an opportunity to decrease the amount of calculations needed for accurate estimation of the landfill safety level and at the same time to simplify the forecasting procedure without accuracy loss.

**Keywords:** forecasting, safety level, simulation modelling, landfill, wastes, risk factors.

**Вступ.** Аналіз надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру, які відбуваються у межах полігонів зі зберігання твердих побутових відходів (ТПВ) та інших видів сміття наявно демонструє присутність взаємозв'язків між джерелами екологічної небезпеки та факторами ризику НС, що можуть виникнути у їхніх межах. Наприклад, в Україні та світі на полігонах та звалищах різного призначення у достатній кількості відбуваються зсуви та обвали великих мас відходів та забруднених ґрунтів, наслідки яких у окремих випадках є катастрофічними. До подібних подій відносяться, зокрема, НС, що сталися у 2015 році у м. Шенжен, Китай (69 загиблих); у 2011 році у м. Багію, Філіппіни (5 загиблих); у 2000 році у м. Кесон-Сіті, Філіппіни (218 загиблих). Усім згаданим катастрофам передували порушення умов накопичення та зберігання відходів, а безпосередньо перед ними у більшості прикладів – серйозне погіршення метеорологічних умов у вигляді злив. Втім, іншим негативним наслідком описаних подій, окрім загибелі людей, стало суттєве збільшення площі, які займають відходи, та їх розповсюдження на територію, не пристосовану для їх безпечного зберігання. Отже, можна зробити висновок, що рівень екологічної небезпеки подібних об'єктів після подібних катастроф різко збільшується.

Особливо проблема забезпечення безпеки полігонів зі зберігання відходів загострюється, якщо декілька різнопланових НС співпадають у часі, оскільки сумарні величини негативного впливу на середовище при цьому суттєво зростають. Зокрема, під час пожежі на полігоні прямий контроль стану маси відходів з метою оцінювання факторів ризику виникнення зсуву або інших НС є суттєво ускладненим через високу температуру палаючих речовин.

Як можна побачити на наведених прикладах, питання зниження ризику виникнення НС та забезпечення екологічної безпеки на полігонах зі зберігання відходів необхідно розглядати з урахуванням усіх взаємозв'язків. Слід зазначити, що й у нормальних умовах функціонування полігону зі зберігання ТПВ суттєвою умовою успішної реалізації заходів й засобів із забезпечення екологічної безпеки є розміщення мас відходів у ізоляції від навколишнього середовища. Це вимагає, зокрема, утримання відходів на виділеному обмеженому майданчику без розповсюдження на прилеглу територію відходів та продуктів їхнього розкладання.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Місця розташування ТПВ є потужними джерелами розповсюдження забруднюючих речовин у

© В. Ю. Колосков. 2016