

УДК 544.77+544.638

Л.Л. Лысенко, Н.А. Мищук, Т.А. Несмеянова

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Институт коллоидной химии и химии воды
им. А.В. Думанского НАН Украины, г. Киев
lysenko_ll@yahoo.com

Исследована эффективность обезвоживания двухкомпонентной дисперсной системы при ее механической обработке и дополнительном воздействии электрического поля. Показано, что при наличии гелеобразной органической составляющей, существенно осложняющей процесс удаления жидкости, степень обезвоживания заметно снижается. Для достижения приемлемых значений конечной влажности в таких системах необходимо создание условий, обеспечивающих электроосмотический перенос жидкости.

Ключевые слова: дисперсия каолинита, давление, суспензия дрожжей, электрокинетический потенциал, электроосмос.

Введение. Обезвоживание дисперсных систем находит широкое применение как при получении целевых продуктов, например в пищевой промышленности, так и при обработке отходов, образующихся в процессе различных производств – фармакологических, бумажных, угледобывающих и других, при получении питьевой воды, а также при очистке сточных вод промышленного и бытового происхождения [1 – 7]. В случае, когда обрабатываемая система является побочным продуктом, т.е. отходами, требующими утилизации, уменьшение их объемов, сопровождающее обезвоживание, позволяет значительно снизить расходы на их транспортировку, переработку и захоронение.

Осадки, образующиеся при очистке сточных вод, характеризуются высоким влагосодержанием, что при резком увеличении за последние годы их объемов обостряет не только экономический, но и экологический аспекты проблемы. Проведение эффективного обезвоживания

© Л.Л. Лысенко, Н.А. Мищук, Т.А. Несмеянова, 2016

позволило бы возвращать в природный круговорот большие количества воды, что будет способствовать сохранению как непосредственно водных, так и земельных ресурсов за счет уменьшения объемов отходов, требующих захоронения, а значит, и за счет уменьшения отводимых для этого территорий.

Однако осадки сточных вод относятся к наиболее проблематичным, с точки зрения обезвоживания, объектам, что обусловлено тонкодисперсной и/или гелеобразной структурой твердой фазы, сложностью ее состава и малым содержанием, иногда достигающим до 1 – 5%. Такие системы характеризуются высокой пластичностью и наличием гидрофильных частиц с высокой удельной поверхностью, что приводит к сильному удержанию воды и, соответственно, значительному ухудшению процесса отделения жидкой фазы по сравнению с системами, содержащими крупные частицы.

Эффективность обезвоживания зависит от состояния воды в осадках. Наиболее распространенная классификация предполагает наличие в них [8, 9]: свободной воды, несвязанной с твердыми частицами; механически связанной воды, удерживаемой флоккулами твердой фазы; физически связанной воды, удерживаемой у поверхности частиц водородными связями; химически связанной воды. Состояние воды в материале определяет величину потребляемой энергии для ее удаления и метод, при помощи которого можно это осуществить.

Наиболее эффективной в отношении получаемого содержания сухого остатка по сравнению с остальными методами является термическая осушка [10], позволяющая удалять всю воду, находящуюся в системе. Процесс осуществляется за счет испарения жидкости при конвективной подаче тепла и в основном определяется следующими параметрами: температурой, относительной влажностью, скоростью подачи воздуха, а также природой и текстурой обрабатываемого материала. Хотя термический метод обеспечивает самую высокую степень обезвоживания, энергозатраты при этом также имеют максимальные значения порядка 617 – 1200 кВт · ч/м³ удаляемой воды [8]. Помимо энергозатрат, к отрицательным сторонам использования высоких температур относится возможность загрязнения воздуха, в том числе продуктами сгорания органических составляющих обрабатываемых систем, что отрицательно сказывается на окружающей среде.

Низкая энергозатратность, характерная для механического обезвоживания, делает его наиболее распространенным методом. К механи-

ческим способам относится фильтрование под давлением, вакуумное фильтрование, центрифугирование и др. [7, 11]. Моделирование механического обезвоживания развивается несколько последних десятилетий, предложенные решения позволяют достаточно точно описать поведение даже таких сложных для фильтрования систем, как биоактивный ил [12 – 14]. Однако, несмотря на низкую энергозатратность и хорошую теоретическую базу, механические методы не всегда эффективны, поскольку с их помощью можно удалять только свободную воду и часть механически связанной воды, а достигаемая при их применении степень обезвоживания невелика, в некоторых случаях она не превышает 60% остаточной влажности. Следует также отметить, что использование механических методов дает приемлемые результаты при обезвоживании достаточно крупнодисперсных осадков. Эффективность механической обработки можно повысить за счет применения физического, химического кондиционирования обрабатываемых систем или высокого давления [5, 7, 15, 16], однако интенсификация зачастую оказывается экономически невыгодной, поскольку требует использования дорогостоящего оборудования и дополнительных затрат на кондиционирование.

Альтернативой методам механического и термического обезвоживания может служить электроосмотическое обезвоживание, для которого тонкодисперсность обрабатываемой системы и ее низкая гидравлическая проницаемость не являются препятствием [17 – 19]. Возможность проведения электрообезвоживания обусловлена наличием двойного электрического слоя в коллоидных системах, обеспечивающего течение жидкости при наложении внешнего электрического поля, при этом удаляться может не только свободная, но и механически связанная вода [8, 17], чего в большинстве случаев вполне достаточно, поскольку эти два типа воды составляют основную часть ее общего объема. При использовании электроосмотического обезвоживания может быть достигнуто необходимое влагосодержание при достаточно низком энергопотреблении, что является однозначным преимуществом перед термическим и механическим методами.

Как показано в ряде исследований, применение электрического поля позволяет, например, на 70% снизить энергозатраты для достижения одного и того же результата по степени осушки по сравнению с термической обработкой [1] или повысить степень обезвоживания разных материалов на 10 – 15% по сравнению с только механическим воздействием [8, 16, 20 – 23].

Совместное использование электроосмотического обезвоживания и давления позволяет интенсифицировать процесс, повысить его эффективность, однако и такое объединение методов имеет свои недостатки. Как правило, оно сопровождается неравномерным распределением воды, пористости, падения потенциала в системе, различным электрокинетическим потенциалом частиц по объему дисперсной системы и др. [16, 20, 24 – 26]. Помимо этого, удаление воды при обработке осадков сточных вод осложняется тем, что данные системы относятся к одним из наиболее проблематичных для обезвоживания объектов, что связано с их тонкодисперсной структурой и сложным составом. Необработанные осадки характеризуются высоким содержанием органической составляющей (~ 60 – 80%), которое хотя и снижается при биологической обработке, однако остается на уровне 40 – 50% [27]. Все это приводит к необходимости дальнейшего изучения рассматриваемого вопроса и усовершенствования процессов обезвоживания.

Цель данной работы – исследование эффективности обезвоживания дисперсной системы, включающей в себя неорганическую и органическую составляющие, и определение условий, при которых наложение внешнего электрического поля позволяет интенсифицировать процесс удаления жидкости.

Методика эксперимента. В качестве объектов исследования использовали суспензию дрожжей на основе водного раствора полисахаридов и дисперсию Глуховецкого каолинита. Суспензия имела гелеобразную структуру, размер дрожжей ~ 8 мкм, влажность – 90%, рН 3,2. Глуховецкий каолинит: полная обменная емкость – 1,3 мг-экв/100 г, рН водной вытяжки 6,37, органические вещества отсутствуют. Величину ζ -потенциала дисперсных частиц в зависимости от величины равновесного рН порового раствора определяли стандартным методом подвижной границы [28].

Эксперименты по обезвоживанию выполняли на установке, конструкция которой позволяет сочетать действие давления и электрического поля. Установка (рис. 1) состоит из платформы (1) с вмонтированной катодной камерой (2) и цилиндра (9), внутри которого за счет собственного веса движется поршень (5) с закрепленной на его нижнем торце анодной камерой (6). На верхнем торце поршня находится платформа (10), на которую устанавливается дополнительный груз. Диаметр цилиндра (9), в который загружается дисперсная система (11), составляет 7 см.

От электродных камер дисперсная система (11) отделена перфорированными дисками (4, 8). На верхнем диске расположена анио-

нообменная мембрана, не пропускающая в дисперсию раствор из электродной камеры и H^+ - ионы, возникающие на аноде вследствие электролиза. На нижнем диске расположена полисульфоновая ткань, предотвращающая вынос в катодную камеру дисперсных частиц, но практически не влияющая на поток удаляемой жидкости. Отвод образовавшихся вследствие электролиза пузырьков газа осуществляется за счет прокачки через электродные камеры промывного раствора.

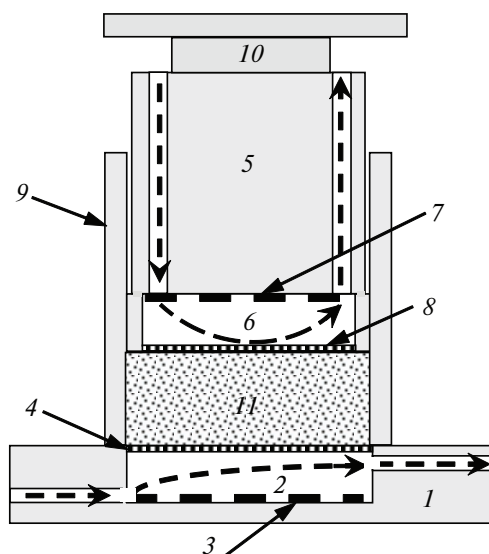


Рис. 1. Экспериментальная установка для обезвоживания дисперсий: 1 – платформа; 2 – катодная камера; 3 – катод; 4, 8 – перфорированные диски; 5 – поршень; 6 – анодная камера; 7 – анод; 9 – цилиндр; 10 – платформа для установки дополнительного груза, 11 – дисперсная система. Стрелками со штриховыми линиями указано направление прокачки раствора через электродные камеры.

Исследования по обезвоживанию дисперсных систем проводили при различных величинах исходной влажности и равновесных значениях рН порового раствора; высота загрузки – $4,4 \pm 0,1$ см. Обработка выполнена при общем давлении в системе $1,8 \cdot 10^4$ Па как в электрическом поле напряженностью 3 В/см, так и в его отсутствие. Для оценки эффективности обезвоживания проводили послойное определение влажности обработанной системы; на основе полученных значений рассчитывали общую конечную влажность. Также с использованием имеющихся данных рассчитывали степень обезвоживания, т.е. соотношение исходного и конечного количества воды в системе.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе работы были выполнены исследования по механическому обезвоживанию чистой дисперсии каолинита, т.е. при обработке только под действием давления. Результаты экспериментов, проведенных при различных величинах исходной влажности и рН порового раствора 9,9, показали, что в отсутствие электрического поля конечная влажность в системе при заданном давлении имеет примерно одинаковые значения (41,5; 42,0, и 41,7%) (рис. 2, кривые 1 – 3). Небольшое их отличие связано с возможностью максимального механического сжатия дисперсии, обусловленной поверхностным зарядом, формой и размером частиц каолинита. Понятно, что при этом степень обезвоживания существенно отличается – для системы с исходной влажностью 75% она составляет 76,4%, для 60% – 51,7%, для 50% – 28,5%. Полученные данные хорошо согласуются с изменением общего объема дисперсии: соотношение конечного и начального объемов составляет соответственно 0,285; 0,522 и 0,7.

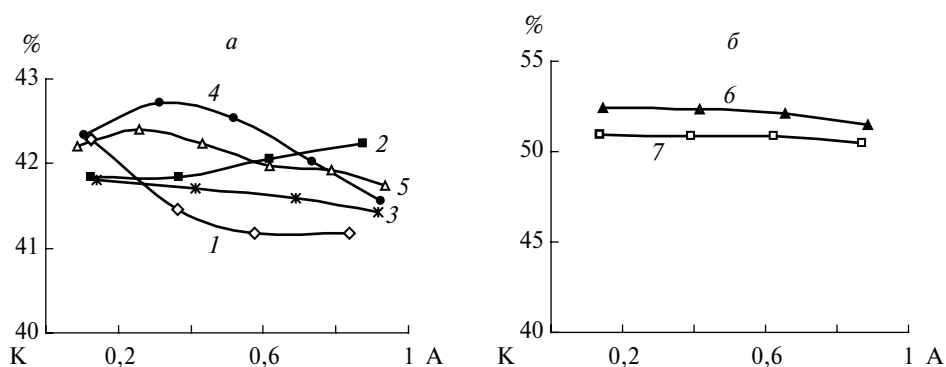


Рис. 2. Распределение влажности в дисперсии каолинита по окончании механической обработки при исходной влажности и рН порового раствора (а): 1 – 75%, рН 9,9; 2 – 60%, рН 9,9; 3 – 50%, рН 9,9; 4 – 50%, рН 2,3; 5 – 50%, рН 2; в системе, содержащей суспензию дрожжей и дисперсию каолинита при общей исходной влажности 65% и рН порового раствора каолинита (б): 4,3 (6); 9,9 (7). К – катод, А – анод.

Изменение рН порового раствора должно влиять на величину ζ -потенциала частиц, т.е. на их электростатическое взаимодействие, и, следовательно, на сжимаемость дисперсии и эффективность ее обезвоживания. В частности, в точке нулевого заряда (т.н.з.) электростатическое отталкивание частиц отсутствует, что должно обеспечить максимальные сжатие дисперсии и степень ее обезвоживания при прочих равных условиях.

Результаты исследования ζ -потенциала частиц каолинита и дрожжей в диапазоне равновесных значений рН порового раствора 2 – 12 представлены на рис. 3. В указанном интервале рН изменяется не только величина, но и знак ζ -потенциала каолинита (кривая 1), т.н.з. соответствует рН 2,3 – 2,4. У дрожжей, согласно кривой 2, изменение знака ζ -потенциала не происходит, более того он возрастает по мере уменьшения рН. Отсюда следует, что частицы дрожжей отталкиваются между собой при любом значении рН, а частицы каолинита – при всех значениях рН, кроме 2,3 – 2,4. При этом, согласно знаку зарядов, частицы каолинита и дрожжей отталкиваются почти во всем интервале рН, за исключением рН < 2,3 – 2,4, где их отталкивание должно смениться притяжением.

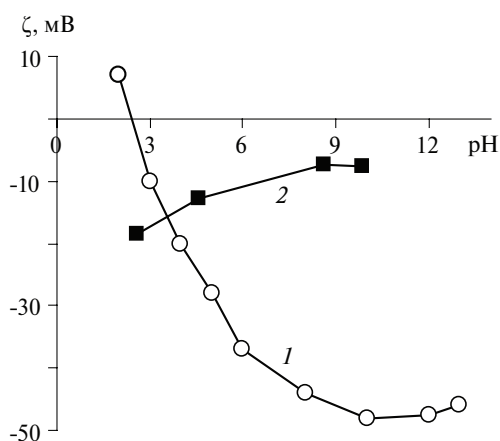


Рис. 3. Величина ζ -потенциала в зависимости от равновесного значения рН порового раствора: 1 – дисперсия каолинита, 2 – суспензия дрожжей.

На основе этих результатов были проведены исследования зависимости обезвоживания дисперсной системы от рН. Сначала были выполнены эксперименты по обработке чистой дисперсии каолинита с фиксированной исходной влажностью 50% при трех значениях рН равновесного порового раствора: отвечающих т.н.з. (рис. 2, кривая 4) и ζ -потенциалам каолинита – 48 и 7 мВ (см. рис. 2, кривые 3 и 5). Полученные данные показали, что при используемых давлении и заданном времени обработки (5 ч) величина ζ -потенциала дисперсии не оказывает влияния на конечную влажность, которая составляет 42,3; 41,7, 42,1% и, соответственно, при одинаковой исходной влажности на степень обе-

звоживания – 26,7; 28,5 и 27,3%. Такое поведение дисперсии может быть связано как с небольшим прикладываемым давлением и малой продолжительностью воздействия, так и с особенностями строения частиц каолинита, не позволяющими обеспечить плотную упаковку системы.

Следующим этапом работы было изучение влияния гелеобразной органической составляющей на процесс механического удаления воды, для чего к каолиниту (исходная влажность – 40%) добавляли равновеликое по массе количество суспензии дрожжей (исходная влажность – 90%), так что усредненная начальная влажность полученной системы составляла 65%.

В экспериментах использовали дисперсию каолинита с равновесными значениями рН порового раствора 9,9 ($\zeta = -48$ мВ) и 4,3 ($\zeta = -22$ мВ). Введение дрожжей с равновесным значением рН 3,2 приводило к снижению суммарного рН дисперсии до значений соответственно 3,6 и 3,4. Поскольку предварительное исследование показало, что процесс протекает значительно медленнее, продолжительность обработки была увеличена до 30 ч. Как и в случае с чистым каолинитом, конечная влажность двухкомпонентной системы отличается незначительно: 50,8 (рис. 2, кривая 7) и 52,1% (рис. 2, кривая 6). Степень обезвоживания при этом составила соответственно 44,4 и 41,4%.

Электрокинетический потенциал дрожжей не должен оказывать отрицательного влияния на процесс обезвоживания, поскольку в исследуемом диапазоне рН порового раствора его значения практически совпадают с таковыми для частиц каолинита и находятся в интервале от –15 до –20 мВ (см. рис. 3). Следовательно, увеличение конечной влажности в системе на ~ 10% связано с двумя факторами: гелеобразной структурой суспензии дрожжей, увеличивающей гидродинамическое сопротивление системы, и тем, что большая часть воды в ней находится в связанной форме, недоступной для механического удаления.

Дальнейшие эксперименты проводили при совместном использовании давления и электрического поля. При обработке чистой дисперсии каолинита с исходной влажностью 50% получены данные, согласующиеся с величиной ζ -потенциала частиц (см. рис. 3, 4). При рН 2,3 порового раствора, отвечающего т.н.з., величина остаточной влажности, составляющая 42,0%, равна таковой при механической обработке 42,3% (см. рис. 4, кривая 1 и рис. 2, кривая 4). Минимальная остаточная влажность (35,5%) достигнута при рН порового раствора 9,9, что соответствует наибольшему значению ζ -потенциала, составляющему –48 мВ (см. рис. 4, кривая 3), и, следовательно, максимально возмож-

ной скорости электроосмоса. Поровый раствор с рН 4,3, обеспечивающий ζ -потенциал на уровне -22 мВ, дает промежуточное значение остаточной влажности, которое составляет 38,9% (см. рис. 4, кривая 2). Степень обезвоживания при этом – соответственно 27,6; 45,0 и 36,3%.

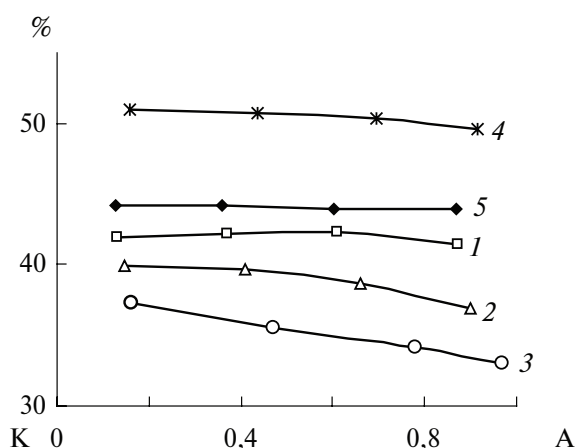


Рис. 4. Распределение остаточной влажности в дисперсии каолинита при рН порового раствора: 2,3 (1); 4,3 (2); 9,9 (3); в системе, содержащей суспензию дрожжей и дисперсию каолинита, при рН порового раствора каолинита: 4,3 (4); 9,9 (5). Напряженность – 3 В/см. К – катод, А – анод.

Следует отметить, что при воздействии электрического поля на дисперсию с заряженными частицами кривые 2 и 3 послойного распределения (см. рис. 4) имеют наклонный характер, в отличие от кривой 1, отвечающей т.н.з. каолинита. По-видимому, практически горизонтальное распределение в последнем случае связано с тем, что конечная влажность определяется только сжимаемостью системы и ее гидродинамическим сопротивлением. При электрической обработке в процессе удаления воды происходит перераспределение общего падения напряжения. В первую очередь жидкость отводится из прианодного слоя. Соответственно, на этом участке уменьшается электропроводность и увеличивается напряженность электрического поля, что способствует более эффективному удалению влаги по сравнению с другими участками.

Переход к системе, содержащей суспензию дрожжей, как и при механическом обезвоживании, приводит к большей остаточной влажности (см. рис. 4, кривые 4, 5), чем в случае чистого каолинита (кривые 1 – 3). При исходном рН каолинита 4,3 достигается влажность 50,7% (степень

обезвоживания – 44,4%), а при рН 9,9 – остаточная влажность 44,4% (степень обезвоживания – 57,7%). Таким образом, если при механической обработке таких систем отличие между степенями их обезвоживания составляло всего 3%, то при сочетании механического воздействия с электрическим это отличие составило 13,3%.

Полученное различие может быть объяснено структурированием двухкомпонентной системы, более сильно выраженным при исходном рН каолинита, равном 9,9. В этом случае в момент смешивания составляющих дисперсии ζ -потенциал частиц каолинита равен – 48 мВ, что приводит к их более сильному отталкиванию от частиц дрожжей (–17 мВ), чем при рН каолинита 4,3 (–22 мВ). В результате в дисперсии формируются своеобразные поры, которые способствуют электроосмотическому отводу жидкости, что особенно важно при гелеобразной структуре органической составляющей дисперсии. Подтверждением идеи о структурировании дисперсии является тот факт, что, несмотря на более высокую степень обезвоживания дисперсии с исходным рН каолинита 9,9, снижение ее объема оказывается меньше, чем при исходном рН 4,3 (соотношение конечного и начального объемов составляет соответственно 0,60 и 0,56).

Выводы. Показано, что система, включающая в себя помимо минеральной (каолинит) гелеобразную органическую составляющую (суспензию дрожжей), проявляет меньшую способность к механическому обезвоживанию. По-видимому, это связано как с ростом ее гидродинамического сопротивления, так и с относительным увеличением доли связанной воды. Наложение электрического поля при обеспечении достаточно высоких значений ζ -потенциала частиц каолинита позволяет добиться уменьшения конечной влажности. Следует предположить, что если в системе остается вода в форме, доступной для удаления электроосмосом, дальнейшего понижения влажности можно достичь за счет регулирования параметров ведения процесса – повышения напряженности электрического поля и увеличения продолжительности обработки, однако при этом следует принимать во внимание и рост энергозатрат на ее проведение. Другим путем для повышения эффективности обезвоживания может быть внесение в систему составляющей, характеризующейся более высокими значениями ζ -потенциала, что должно сопровождаться как непосредственной интенсификацией электроосмотического течения при прочих равных условиях, так и увеличением отвода жидкости за счет структурирования дисперсии.

Резюме. Досліджено ефективність зневоднення двокомпонентної дисперсної системи при її механічній обробці і додатковому впливі електричного поля. Показано, що при наявності гелеподібної органічної складової, яка істотно ускладнює процес видалення рідини, ступінь зневоднення помітно зменшується. Для досягнення прийнятних значень кінцевої вологості в таких системах необхідно створення умов, що забезпечують електроосмотичне перенесення рідини.

L.L. Lysenko, N.A. Mishchuk, T.A. Nesmeyanova

ELECTROKINETIC INTENSIFICATION OF DEWATERING OF COMPLEX DISPERSE SYSTEMS

Summary

The study of the efficiency of dewatering of a two-component disperse system during its mechanical treatment and additional exposure to an electric field is carried out. It is shown that in the presence of gellike organic component, significantly complicating the fluid removal process, the degree of dewatering considerably reduces. To achieve the acceptable final moisture of such systems it is necessary to create conditions that provide electroosmotic transport of liquid.

Список использованной литературы

- [1] *Al-Asheh S., Jumah R., Banat F., Al-zou'bi K.* // Food Bioprod. Process. – 2004. – **82**, С3. – P. 193 – 200.
- [2] *Bazhal M.I., Lebovka N.I., Vorobiev E.* // J. Food Eng. – 2001. – **50**. – P. 129 – 139.
- [3] *Fourie A.B., Jones C.J.F.P.* // Geotext. Geomemb. – 2010. – **28**. – P. 181 – 190.
- [4] *Kyllo-nen F., Lehto J., Pirkonen P., Gro-nroos A., Pakkanen H., Alén R.* // Water Sci. Technol. – 2010. – **62**, N2. – P. 387 – 393.
- [5] *Verrelli D.I., Dixon D.R., Scales P.J.* // Colloids Surf., A. – 2009. – **348**, N 1/3. – P. 14 – 23.
- [6] *Raynaud M., Vaxelaire J., Olivier J., Dieudé-Fauvel E., Baudez J.C.* // Water Res. – 2012. – **46**, N14. – P. 4448 – 4456.
- [7] *Qi Y., Thapa K.B., Hoadley A.F.A.* // Chem. Eng. J. – 2011. – **171**. – P. 373 – 384.
- [8] *Mahmoud A., Olivier J., Vaxelaire J., Hoadley A.F.A.* // Water Res. – 2010. – **44**. – P. 2381 – 2407.

- [9] *Glendinning S., Lamont-Black J., Jones C.J.F.P.* // *J. Hazard. Materials., A.* – 2007. – **139**. – P.491 – 499.
- [10] *Vaxelaire J., Bongiovanni J. M., Mousquesand P., Puiggali J.R.* // *Water Res.* – 2000. – **34**, N17. – P. 4318 – 4323.
- [11] *Xian-shu D., Xiao-jie H., Su-ling Y., Wei-peng R., Zhi-zhong W.* // *Procedia Earth and Planetary Sci.* – 2009. – **1**. – P. 685 – 693.
- [12] *Ruth B.F.* // *J. Ind. Eng. Chem.* – 1946. – **38**. – P. 564 – 571.
- [13] *Sorensen P.B., Moldrup P., Hansen J.A.* // *Chem. Eng. Sci.* – 1996. – **51**, N6. – P. 967 – 979.
- [14] *Lee D.J., Wang C.H.* // *Water Res.* – 2000. – **34**, N1. – P. 1 – 20.
- [15] *Jing S.R., Lin Y.F., Lin Y.M., Hsu C.S., Huang C.S., Lee D.Y.* // *J. Environ. Sci. Health, A.* – 1999. – **34**, N7. – P. 1517 – 1531.
- [16] *Larue O., Wakeman R.J., Tarleton E.S., Vorobiev E.* // *Chem. Eng. Sci.* – 2006. – **61**, N14. – P. 4732 – 4740.
- [17] *Zhou J., Liu Z., She P., Ding F.* // *Drying Technol.* – 2001. – **19**, N3/4. – P. 627 – 638.
- [18] *Yuan C., Weng C.-H.* // *Adv. Environ. Res.* – 2003. – **7**. – P. 727 – 732.
- [19] *Reuter M.A., Van Deventer J.S.J., Wilmans W.* // *Miner. Eng.* – 1992. – **5**, N7. – P. 835 – 849.
- [20] *Weber K., Stahl W.* // *Sep. Purif. Technol.* – 2002. – **26**. – P. 69 – 80.
- [21] *Yang G.C.C., Chen M.-C., Yeh C.-F.* // *Ibid.* – 2011. – **79**. – P. 177 – 182.
- [22] *Barton W.A., Miller S.A., Veal C.J.* // *Drying Technol.* – 1999. – **17**, N3. – P. 497 – 522.
- [23] *Raats M.H.M., van Diemen A.J.G., Lave'n J., Stein H.N.* // *Colloids Surf., A.* – 2002. – **210**. – P. 231 – 241.
- [24] *Mahmoud A., Olivier J., Vaxelaire J., Hoadley A.F.A.* // *Water Res.* – 2011. – **45**. – P. 2795 – 2810.
- [25] *Curvers D., Maes K.C., Saveyn H., De Baets B., Miller S., Van der Meeren P.* // *Chem. Eng. Sci.* – 2007. – **62**. – P. 2267 – 2276.
- [26] *Lysenko L.L., Mishchuk N.A., Rynda E.F.* // *J. Water Chem. and Technol.* – 2011. – **33**, N 3. – P. 140 – 146.
- [27] *Tuan P.-A., Mika S., Pirjo I.* // *Drying Technol.* – 2012. – **30**. – P. 691 – 706.
- [28] *Баранова В.И., Бибик Е.Е., Кожевникова Н.М., Лавров И.С., Малов В.А.* *Практикум по коллоидной химии / Под ред. И.С. Лаврова.* – М.: Высш. шк., 1983. – 216 с.

Поступила в редакцию 20.04.2016 г.