

УДК 544.77; 628.54; 628.33

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И КОАГУЛЯЦИИ ЛИОФОБНЫХ ЗОЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Е.Е. Гончаренко, Б.С. Ксенофонтов, А.М. Голубев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: eeg84@mail.ru

Для очистки сточных вод промышленных производств в целях эффективного подбора коагулянтов, содержащих соли металлов, необходимо учитывать не только влияние многозарядных ионов на процесс коагуляции, гидролиз солей, но и возможную взаимную коагуляцию зелей. В связи с этим при выборе реагентов для водоочистки следует принимать во внимание как их адсорбционную емкость, так и агрегативную устойчивость образующихся зелей, определяемую порогом коагуляции. Разработаны методики для исследования коагуляции, устойчивости и стабилизации лиофобных зелей с применением компьютерной технологии, позволяющей достаточно быстро получить необходимые экспериментальные результаты. Методики опробованы на электролитной коагуляции золя $\text{Fe}(\text{OH})_3$ с положительно заряженными коллоидными частицами и золя MnO_2 с отрицательно заряженными коллоидными частицами, а также на их взаимной коагуляции. Создана методика для изучения стабилизации зелей. Показано, что результаты эксперимента соответствуют имеющимся литературным данным. Приведены некоторые рекомендации для водоочистки смесью электролитов-коагулянтов, а также рекомендации для процесса взаимной коагуляции зелей.

Ключевые слова: водоочистка, коагулянты, экология, дисперсные системы, коллоидные растворы, коагуляция, лиофобные золи, компьютерная технология, агрегативная устойчивость, взаимная коагуляция зелей.

INVESTIGATION OF STABILITY AND COAGULATION OF LYOPHOBIC SOLS USING COMPUTER TECHNOLOGY

E.E. Goncharenko, B.S. Ksenofontov, A.M. Golubev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: eeg84@mail.ru

To select effectively the coagulants, containing salts of metals, for purification of industrial waste waters, it is necessary to take into account not only the influence of multiply charged ions on coagulation process, hydrolysis of salts but also the probable mutual coagulation of sols. Therefore, when the reagents for water purification are selected, both their adsorptive capacity and the aggregate stability of the formed sols (that is determined by the coagulation threshold) should be considered. Techniques are developed for studying coagulation, stability and stabilization of lyophobic sols with application of computer technology allowing one to obtain quickly enough the necessary experimental results. The techniques were tested for the electrolytic coagulation of the $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sol with positively charged colloidal particles and the MnO_2 sol with negatively charged ones, as well as for their mutual coagulation. The technique is created for studying the stabilization of sols. It is shown that experiment

results agree with the data available in literature. Some recommendations are given for water purification using a mix of electrolytes-coagulants and also for the process of mutual coagulation of sols.

Keywords: water purification, coagulants, ecology, disperse systems, colloids, coagulation, lyophobic sols, computer technology, aggregate stability, mutual coagulation of sols.

Дисперсные системы играют важную роль в научно-техническом прогрессе. Коллоидно-химические процессы лежат в основе многих технологических операций радиоэлектронной, пищевой и легкой промышленности, в производстве строительных материалов и медицинских препаратов. Огромное значение имеют дисперсные системы в экологических процессах, так как гидросфера, атмосфера, кора Земли и ее недра, организмы растений и животных представляют собой сложную совокупность грубодисперсных и коллоидно-дисперсных систем.

Настоящая статья является результатом исследований, проводимых совместно с кафедрой “Промышленная экология” МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством академика РЭА, доктора технических наук, профессора Б.С. Ксенофонтова. Исследования связаны с использованием коагулянтов в процессах водоочистки и удалению из воды взвесей, коллоидных растворов гидроксидов, жиров, нефтепродуктов и др.

Коагулянты на основе солей алюминия и железа хорошо известны в практике очистки воды. Еще относительно недавно (в XX в.) сернокислый алюминий повсеместно применяли в процессах водоочистки в России и за рубежом [1–12]. В последние годы этот коагулянт был заменен другим алюмосодержащим коагулянтом – аква-ауратом, который оказался более эффективным в процессах очистки воды [4, 5]. Особой эффективностью отличается алюмосодержащий реагент в виде гидроксида алюминия $Al(OH)_3$, получаемого в электрохимической ячейке, который обладает высокой адсорбционной емкостью. В последние годы появились работы, в которых рассмотрены методы его более эффективного использования [1, 8]. Это позволяет надеяться на более широкое применение данного реагента.

Кроме алюмосодержащих коагулянтов широко распространены железосодержащие реагенты, в частности сернокислое железо $FeSO_4$, хлорное железо $FeCl_3$, гидроксид железа $Fe(OH)_3$, а также другие вещества, основной компонент которых – соединения на основе железа [6, 8, 10, 11]. В работах [7, 9, 12] предложено использовать в качестве коагулянта смесь, состоящую из алюмо- и железосодержащих реагентов, что в ряде случаев позволяет улучшить результаты водоочистки.

Для эффективного применения коагулянтов необходимо разобраться в механизме их действия. При использовании реагентов в виде солей алюминия или железа следует учитывать не только их адсорбционную емкость и влияние присутствия многозарядных ионов металлов на процесс коагуляции, но и гидролиз, приводящий к образованию гидроксидов металлов, а также взаимную коагуляцию зольей. В связи с этим очищенный гидроксид алюминия, полученный электрохимическим путем, может дать более высокие показатели эффективности при водоочистке по сравнению с солью $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Таким образом, при выборе реагентов для водоочистки кроме адсорбционных свойств требуется учитывать агрегативную устойчивость зольей, которая определяется порогом коагуляции [13].

В связи с этим была разработана методика изучения коагуляции и стабилизации и взаимной коагуляции лиофобных зольей с компьютерным вариантом выполнения и обработки экспериментальных данных, позволяющая достаточно быстро получить необходимые экспериментальные результаты. Несмотря на то, что одним из основных направлений модернизации современных научных исследований является внедрение новых технологий, в том числе компьютерных, в литературе отсутствуют работы по применению компьютерных технологий для изучения свойств коллоидных систем.

Авторами настоящей статьи была разработана методика фотоколориметрического титрования с компьютерным и программным обеспечением с использованием оборудования, предложенного в работе [14]. Измерительная система представляет собой комплект датчиков (электропроводности, оптической плотности, температуры, объема жидкого реагента, объема газа и т.д.), подключенных к компьютеру через измерительный блок. Программа позволяет в различных режимах регистрировать сигналы, поступающие от датчиков, и отображать их на экране монитора. Возможно одновременное подключение нескольких датчиков и автоматическое подключение градуировки датчиков. При работе можно выбирать диапазоны значений параметров, отложенных по осям координат экспериментальных кривых. Допускается остановка записи данных в любой момент времени и оперативный просмотр экспериментальных кривых на экране монитора, а также сохранение полученных результатов в виде текстовых форматов. На рис. 1 приведены окна программы и переходы между ними.

Поскольку для изучения устойчивости и коагуляции зольей использовалась методика фотоколориметрического титрования, работа выполнялась с помощью датчика оптической плотности ($\lambda = 590$ нм) и датчика объема жидкого реагента (рис. 2). Коагуляцию зольей исследовали измерением оптической плотности коллоидных растворов, для чего оптическую кювету помещали на магнитную мешалку. После

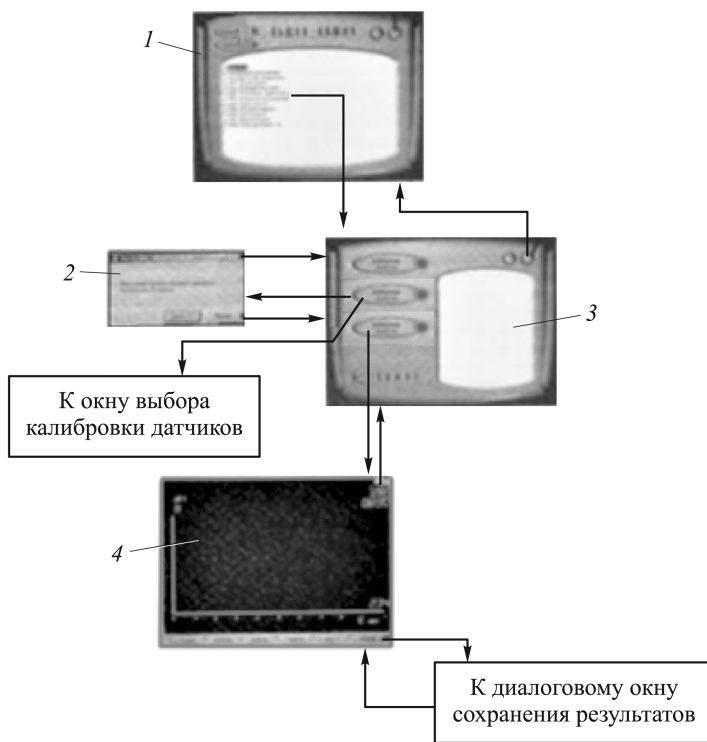


Рис. 1. Окна программы:

1 — окно выбора сценария; 2 — диалоговые окна настройки оборудования; 3 — окно запуска эксперимента; 4 — окно измерений

настройки оборудования в кювету наливали 80 мл коллоидного раствора и вращением рукоятки датчика объема постепенно добавляли по 0,2–0,5 мл электролита. При добавлении каждой порции электролита в компьютер вводили результат измерения оптической плотности коллоидного раствора. При включении системы измерений в окне измерений появляется экран с системой координат. По оси ординат откладываются значения оптической плотности коллоидного раствора, по оси абсцисс — объем добавляемого электролита. В правом верхнем углу экрана находятся цифровые индикаторы, численно показывающие соответствующие значения параметров. Таким образом, при проведении

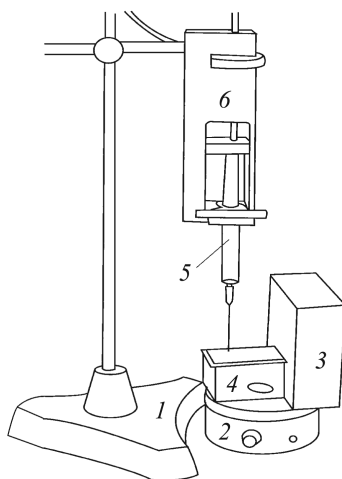


Рис. 2. Схема установки для фотоколориметрического титрования:

1 — штатив; 2 — магнитная мешалка; 3 — датчик оптической плотности; 4 — оптическая кювета; 5 — шприц; 6 — датчик объема жидкого реагента

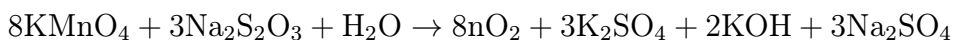
работы на экране монитора отображается экспериментально полученная зависимость оптической плотности коллоидного раствора (D) от объема добавленного электролита ($V_{эл}$).

При коагуляции оптическая плотность возрастает. Измерения проводят до стабилизации показаний оптической плотности. Данные могут обрабатываться по любой стандартной программе. После окончания экспериментов изображенные на экране монитора зависимости оптической плотности раствора от объема добавленного электролита $D = f(V_{эл})$ перестраивают по текстовым форматам. По координатам максимума на данной зависимости определяют пороговый объем электролита, вызывающий быструю коагуляцию золя [15–17]. Когда экспериментальные кривые не имеют четко выраженной точки перегиба, для более точного установления координаты максимума строят зависимость $dD/dV_{эл} = f(V_{эл})$. Значение $dD/dV_{эл}$ находят как $\operatorname{tg} \beta = dD/dV_{эл} = a/b$. С помощью перпендикуляра, опущенного на ось абсцисс из точки пересечения двух кривых, можно вычислить пороговый объем электролита. Порог быстрой коагуляции γ , т.е. минимальную концентрацию электролита, выше которой скорость коагуляции достигает максимального значения и остается постоянной, рассчитывают по формуле

$$\gamma = \frac{C_{эл} V_{эл}}{V},$$

где $C_{эл}$ — концентрация добавленного электролита, моль/л; $V = V_{эл} + V_3$ — объем раствора; V_3 — объем золя, $V_3 = 80$ мл.

Рассматриваемая методика была опробована на процессах коагуляции электролитами золя гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ с положительно заряженными коллоидными частицами золя диоксида магния MnO_2 с отрицательно заряженными коллоидными частицами, а также на их взаимной коагуляции. Золи $\text{Fe}(\text{OH})_3$ получали гидролизом соли FeCl_3 , для чего в колбу с 250 мл кипящей воды добавляли 10 мл 2%-ного раствора хлорида железа (III). Образовавшийся золь охлаждали до комнатной температуры [15, 18]. Золи MnO_2 получали восстановлением по реакции [18]:



Знак заряда коллоидных частиц определяли электрофоретическим и капиллярным методами. Используемые датчики были предварительно откалиброваны.

Коагуляцию золя $\text{Fe}(\text{OH})_3$ с положительно заряженными коллоидными частицами проводили с использованием электролитов, имеющих одинаковые катионы и концентрацию $C_{эл} = 0,82$ г/л. Результаты коагуляции приведены ниже:

Электролит	Коагулирующий ион	Порог коагуляции γ , ммоль/л
KCl	Cl ⁻	9,7
KBr	Br ⁻	12,4
K ₂ SO ₄	SO ₄ ²⁻	0,19
K ₃ [Fe(CN) ₆]	[Fe(CN) ₆] ³⁻	0,018

Согласно теории Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека (ДЛФО), зависимость порога коагуляции γ от заряда коагулирующего иона Z описывается уравнением Дерягина – Ландау [15–17, 19]:

$$\gamma = K \left(\frac{1}{Z^6} \right).$$

Такой характер зависимости подтверждают и экспериментальные данные, находящиеся в соответствии с литературными [15]. Сильная зависимость порога от заряда коагулирующего иона имеет место для электролитной коагуляции, протекающей по концентрационному механизму под действием индифферентных электролитов.

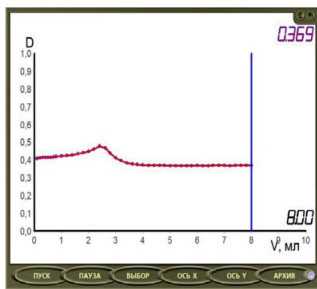
Для оценки возможности применения разработанной методики к процессу взаимной коагуляции зольей были проведены эксперименты по установлению влияния заряда коагулирующего иона на порог коагуляции золя MnO₂ с отрицательно заряженными коллоидными частицами. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости оптической плотности коллоидного раствора MnO₂ от объема добавленных электролитов NaCl (рис. 3, а) и FeCl₃ (рис. 3, б).

По результатам эксперимента был установлен порог коагуляции при использовании коагулирующих электролитов (NaCl, MgCl₂ и FeCl₃), содержащих положительно заряженные катионы различного заряда и одинаковый анион. Результаты расчета порога коагуляции для коллоидного раствора MnO₂ с концентрацией дисперсной фазы $C = 1,8$ г/л приведены ниже:

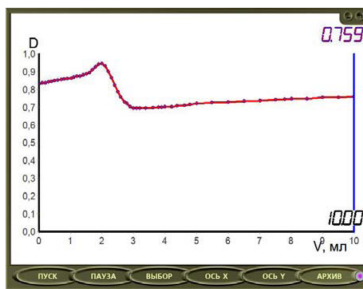
Электролит	Коагулирующий ион	Порог коагуляции γ , ммоль/л
NaCl	Na ⁺	49
MgCl ₂	Mg ²⁺	0,75
BaCl ₂	Ba ²⁺	0,77
FeCl ₃	Fe ³⁺	0,061

Рассчитанные значения γ также находятся в соответствии с литературными данными [15, 16–18].

При сливании двух гидрофобных зольей с различными знаками зарядов коллоидных частиц возможна взаимная коагуляция, происходящая в результате нейтрализации зарядов. Большое значение взаимной коагуляции зольей для водоочистки связано с тем, что этот вариант не



a



б

Рис. 3. Экспериментальные зависимости оптической плотности коллоидного раствора MnO_2 от объема добавленных электролитов NaCl (*a*) и FeCl_3 (*б*)

требует использования больших количеств электролитов-коагулянтов, которые отсутствуют в сточных водах. Это, несомненно, является огромным преимуществом по сравнению с традиционным вариантом электролитной коагуляции зольей.

Как уже было отмечено, компьютерная методика была применена к процессу взаимной коагуляции зольей MnO_2 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$. При проведении экспериментов в оптическую кювету наливают 80 мл коллоидного раствора MnO_2 . Золь $\text{Fe}(\text{OH})_3$ объемом 0,2–0,3 мл добавляют с помощью датчика объема жидкого реагента. Экспериментальная зависимость оптической плотности коллоидного раствора MnO_2 от объема добавляемого золя $\text{Fe}(\text{OH})_3$ приведена на рис. 4. Перпендикуляр, опущенный из точки максимума на ось абсцисс, позволяет определить пороговый объем.

При проведении экспериментов по коагуляции зольей $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и MnO_2 установлено, что агрегативная устойчивость, оцениваемая порогом коагуляции, зависит от скорости введения электролита. Для золя $\text{Fe}(\text{OH})_3$ при медленном режиме добавления электролита усиливается эффект стабилизации золя. Возникает эффект привыкания золя к электролиту и порог коагуляции увеличивается. Это можно объяснить предположением о наличии наряду с коагуляцией процесса пептизации дисперсной фазы [16]. Для золя MnO_2 наблюдается обратный эффект, когда коагуляция вызывается меньшим количеством электролита при медленном его введении. Механизм этого явления до сих

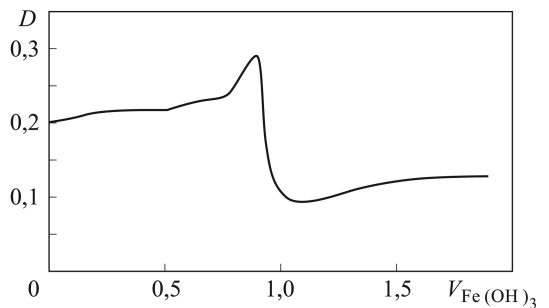


Рис. 4. Экспериментальная зависимость оптической плотности коллоидного раствора MnO_2 от объема добавляемого золя $\text{Fe}(\text{OH})_3$ при взаимной коагуляции зольей

пор неясен, однако наличие отчетливо выраженной зависимости порога коагуляции от скорости введения электролита позволяет изменять в требуемом направлении агрегативную устойчивость реальных дисперсных систем, что очень важно при водоочистке.

Разработанная методика может быть применена и для изучения стабилизации коллоидных систем, которая имеет большое значение для многих процессов, используемых в биологии и медицине, например для изготовления лекарственных препаратов.

Для стабилизации обычно применяют высокомолекулярные соединения (ВМС), растворимые в воде (поливиниловый спирт, крахмал, декстрин), а также полиэлектролиты (желатин, казеин, замещенные эфиры целлюлозы и др.). Наряду с растворами ВМС используют поверхностно-активные вещества (ПАВ), к которым относятся соли и эфиры высших карбоновых кислот. Стабилизирующее действие основано на образовании на поверхности частиц дисперсной фазы адсорбционных гелеобразных пленок и связано как с уменьшением межфазного натяжения, так и со структурно-механическими свойствами пленки [16, 17, 19].

В качестве стабилизатора в эксперименте использовали раствор желатина. Для выполнения экспериментов по стабилизации, например золь $\text{Fe}(\text{OH})_3$, сначала строили зависимость оптической плотности коллоидного раствора от объема добавленного электролита $D = f(V_{\text{эл}})$, например 0,005 мл раствора K_2SO_4 . По координатам максимума, взятым с кривой, рассчитывали пороговый объем электролита $V_{\text{пор}}$ (рис. 5, а). Для определения минимального объема желатина, при добавлении которого происходит коллоидная защита ($V_{\text{защ}}$), в оптическую кювету с 80 мл коллоидного раствора с помощью датчика объема жидкого реагента добавляли 0,3 мл раствора желатина концентрацией 10 г/л. Коллоидный раствор в течение 5–10 мин перемешивали магнитной мешалкой для адсорбции желатина на поверхности коллоидных

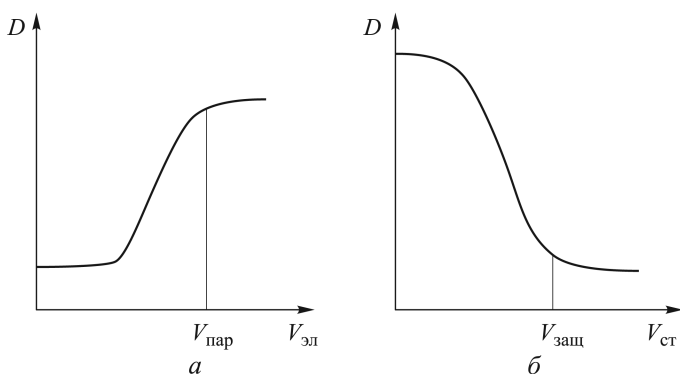


Рис. 5. Зависимости оптической плотности раствора золь от объема добавленного электролита (а) и от объема раствора желатина (б)

частиц. Далее добавляли пороговый объем электролита K_2SO_4 и фиксировали оптическую плотность раствора золя, затем добавляли еще 0,3 мл раствора желатина и пороговый объем электролита и так до тех пор, пока значения оптической плотности коллоидного раствора не стабилизировались. Зависимости оптической плотности раствора золя от объема добавленного электролита и от объема раствора желатина приведены на рис. 5. Объем $V_{зщ}$, соответствующий коллоидной защите, определяли по координатам минимума, взятым с нижней горизонтальной кривой оптической плотности раствора золя от объема стабилизатора $D = f(V_{ст})$ (рис. 5, б).

Для стабилизации золя MnO_2 использовали раствор желатина концентрацией 0,1 г/л. Полученные результаты соответствуют имеющимся литературным данным [15, 17].

Выводы и рекомендации. 1. Разработаны методики исследования устойчивости, коагуляции, стабилизации, а также взаимной коагуляции лиофобных зольей с компьютерным вариантом выполнения и обработкой данных. Экспериментальные результаты по изучению устойчивости и коагуляции лиофобных зольей, полученные с применением компьютерной технологии, соответствуют литературным данным.

2. Предложенные методики отсутствуют в литературе и могут быть рекомендованы для определения устойчивости и коагуляции лиофобных зольей, а также их стабилизации. Следует учитывать, что воспроизводимость экспериментальных результатов достигается только при условии постоянной скорости введения электролита. Это особенно важно при водоочистке, поскольку варьируя скорость подачи реагента, можно изменять агрегативную устойчивость зольей.

3. При применении смесей электролитов-коагулянтов необходимо иметь в виду, что когда у электролитов одинаковые заряды коагулирующих ионов, наблюдается, как правило, аддитивность их действия. В других случаях электролиты могут противодействовать (антагонизм) или способствовать коагулирующему действию (синергизм). Поэтому правильный выбор компонентов в смеси электролитов и научно обоснованный поиск синергических композиций при коагуляции реальных коллоидных систем будет способствовать достижению позитивных результатов при очистке промышленных сточных вод, а также в технологических процессах получения питьевой воды.

4. Изучение взаимной коагуляции зольей показало, что вариант коагуляции золя зольем не требует больших количеств электролитов-коагулянтов, что является большим преимуществом по сравнению с традиционным вариантом электролитной коагуляции. Он более предпочтителен для очистки сточных вод промышленных предприятий.

В качестве одного из перспективных способов коагуляции золя золем следует рассматривать совместное применение селективных электролитов и полиэлектролитов (анионных и катионных) с высокими константами диссоциации ионногенных звеньев в широком диапазоне значений рН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ксенофонтов Б.С.* Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
2. *Ксенофонтов Б.С.* Технология очистки промышленных сточных вод энергопредприятий // Безопасность жизнедеятельности: Приложение. 2009. № 7. 24 с.
3. *Ксенофонтов Б.С.* Биотехнологические методы очистки воды, почвы и воздуха // Безопасность жизнедеятельности: Приложение. 2010. № 2. 24 с.
4. *Ксенофонтов Б.С.* Интенсификация очистки сточных вод химических производств с использованием биофлокулянтов // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 10. 24 с.
5. *Ксенофонтов Б.С.* Проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий // Безопасность жизнедеятельности: Приложение. 2011. № 3. 24 с.
6. *Сорокина И.Д., Дресвянников А.Ф.* Железоалюминиевый коагулянт для очистки воды // Экология и промышленность России. 2010. № 5. С. 48–51.
7. *Сорокина И.Д., Дресвянников А.Ф., Юсупов Р.А., Девятков В.Ф.* Гетероядерные соединения в системах на основе Fe(II), Fe(III), Al(III), SO₄²⁻, C₆H₆-H₂O-OFT, NH₃ // Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83. Вып. 4. С. 540–545.
8. *Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов А., Балина А., Виноградов М.С.* Технология очистки стоков с помощью реагентной флотации // Экология производства. 2013. № 4. С. 60–63.
9. *Arrojo S., Benito Y.* A theoretical study of hydrodynamic cavitation // Ultrasonics Sonochemistry. 2008. No. 15. P. 203–211.
10. *Arrojo S., Benito Y.* Treatment of wastewater streams containing phenolic compounds using hybrid techniques based on cavitation: A review of the current status and the way forward // Ultrasonics Sonochemistry. 2007. No. 10. P. 100–115.
11. *Introduction to Effluent Treatment and Industrial Methods* // Resonance. 2000. Vol. 5. No. 10. P. 56–68.
12. *Suslik K.S.* Liquid oxidation: Hydrodynamic capitation for effective oxidation // Technology review. 2007. November. P. 16–18.
13. *Гончаренко Е.Е., Бадаев Ф.З., Авсинева Н.К.* Устойчивость и коагуляция лиофобных золь. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 48 с.
14. *Жилин Д.М.* Общая химия. Практикум “L-микро”. М.: МГИУ, 2006. 322 с.
15. *Назаров В.В., Гродский А.С., Моргунов А.Ф.* и др. Практикум и задачник по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы; под ред. В.В. Назарова, А.С. Гродского. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. 374 с.
16. *Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Высш. шк., 2006. 444 с.
17. *Шершавина А.А.* Физическая и коллоидная химия. Методы физико-химического анализа. М.: Новое знание, 2005. 800 с.
18. *Гольфман М.И., Кирсанова Н.В., Ковалевич О.В.* Практикум по коллоидной химии; под ред. М.И. Гольфмана. СПб.: Лань, 2005. 256 с.
19. *Кругляков П.М., Хаскова Т.Н.* Физическая и коллоидная химия. М.: Высш. шк., 2005. 319 с.

REFERENCES

- [1] Ksenofontov B.S. *Flotatsionnaya obrabotka vody, otxodov i pochvy* [The floatation treatment of water, waste and soil]. Moscow, Novye Texnologii Publ., 2010, 272 p.
- [2] Ksenofontov B.S. Purification technology of industrial sewage for power - factories. *Bezopasnost' zhiznedeyatelnosti: Prilozhenie* [The Safety of a Life Activity: App.], 2009, no. 7, pp. 1–24 (in Russ.).
- [3] Ksenofontov B.S. Biotechnological methods of water, soil and air purification. *Bezopasnost' zhiznedeyatelnosti: Prilozhenie* [The Safety of a Life Activity: App.], 2010, no. 2, pp. 1–24 (in Russ.).
- [4] Ksenofontov B.S. Intensification of sewage purification for chemical fabrication with use bioflocculant. *Bezopasnost' zhiznedeyatelnosti: Prilozhenie* [The Safety of a Life Activity: App.], 2009, no. 10, pp. 1–24 (in Russ.).
- [5] Ksenofontov B.S. Problems of sewage purification for the industrial factories. *Bezopasnost' zhiznedeyatelnosti: Prilozhenie* [The Safety of a Life Activity: App.], 2011, no. 3, pp. 1–24 (in Russ.).
- [6] Sorokina I.D., Dresvyannikov A.F. Iron-aluminum coagulant for water purification. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2010, no. 5, pp. 48–51 (in Russ.).
- [7] Sorokina I.D., Dresvyannikov A.F., Yusupov R.A., Devyatov V.F. The heteronuclear connections in systems based on Fe(11), Fe (111), Al (111), SO₄²⁻, SG-H₂O-OFT, NH₃. *Zhurnal prikladnoj khimii* [J. App. Chem.], 2010, vol. 83, no. 4, pp. 540–545 (in Russ.).
- [8] Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov A., Balina A., Vinogradov M.S. Technology of flow using reagent floatation. *Ekologiya proizvodstva* [Production Ecology], 2013, no. 4, pp. 60–63 (in Russ.).
- [9] Arrojo S., Benito Y. A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, no. 15, pp. 203–211.
- [10] Arrojo S., Benito Y. Treatment of wastewater streams containing phenolic compounds using hybrid techniques based on cavitation: A review of the current status and the way forward. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, no. 10, pp. 100–115.
- [11] Introduction to Effluent Treatment and Industrial Methods. *Resonance*, 2000, vol. 5, no. 10, pp. 56–68.
- [12] Suslik K.S. Liquid oxidation: Hydrodinamic capitation for effective oxidation. *Technology review*, 2007, November, pp. 16–18.
- [13] Goncharenko E.E., Badaev F.Z., Avsineeva N.K. *Ustojchivost' i koagulyatsiya liofobnykh zolej* [Stability and coagulation of lyophobic sols]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2011, 48 p.
- [14] Zhilin D.M. *Obschaya khimiya. Praktikum "L-mikro"* [General chemistry. Practical work "L-micro"]. Moscow, MGIU Publ., 2006, 322 p.
- [15] Nazarov V.V., Grodskij A.S., Morgunov A.F., eds. *Praktikum i zadachnik po kolloidnoj khimii. poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Practical work and problem book on colloidal chemistry. Superficial phenomena and disperse systems]. Moscow, IKTC "Akademkniga" Publ., 2007, 374 p.
- [16] Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloidal chem.]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2006, 444 p.
- [17] Shershavina A.A. *Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya. metody fiziko-khimicheskogo analiza* [Physical and colloidal chem. Methods of the physical and chem. analysis]. Moscow, Novoe Znanie Publ., 2005, 800 p.
- [18] Golfman M.I., Kirsanova N.V., Kovalevich O.V., eds. *Praktikum po kolloidnoj khimii* [Practical work on colloidal chem.]. S.- Petersburg, "Lan" Publ., 2005, 256 p.
- [19] Kruglyakov P.M., Xaskova T.N. *Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya* [Physical and colloidal chem.]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005, 319 p.

Статья поступила в редакцию 04.07.2013

Евгения Евгеньевна Гончаренко — канд. хим. наук, доцент кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области физической химии.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.E. Goncharenko — Cand. Sci. (Chem.), assoc. professor of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of physical chemistry.
Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Борис Семенович Ксенофонтов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ, в том числе семи монографий, в области очистки природных и сточных вод.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

B.S. Ksenofontov — Dr. Sci. (Chem.), professor of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications including seven monographs in the field of purification of natural and waste waters.
Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Михайлович Голубев — д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области кристаллохимии неорганических соединений и физической химии.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.M. Golubev — Dr. Sci. (Chem.), professor, head of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of crystal chemistry of inorganic compounds and physical chemistry.
Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.