

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КОМПОЗИЦИОННЫМ КОАГУЛЯНТОМ-ФЛОКУЛЯНТОМ НА ОСНОВЕ НЕФЕЛИНОВОГО СЫРЬЯ

© А. И. Смирнова, А. Б. Дягилева

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
Высшая школа технологии и энергетики,  
198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4  
E-mail: smirnova\_nasty87@mail.ru

Поступила в Редакцию 8 октября 2019 г.  
После доработки 14 декабря 2020 г.  
Принята к публикации 23 декабря 2020 г.

*Приведены сравнительные исследования по оценке влияния температуры на коагулирующую способность композиционного коагулянта-флокулянта на основе нефелинового сырья и традиционного коагулянта сульфата алюминия по отношению к сульфатному лигнину в интервале температур 4–30°C. Показано преимущество композиционного коагулянта-флокулянта при его использовании в технологии физико-химической очистки при низких температурах с обеспечением устойчивого эффекта осветления сточных вод от лигногуминовых примесей в широком диапазоне pH.*

Ключевые слова: коагулирование; коагулянт; флокулянт; нефелиновый коагулянт; цветность; температура воды; холодный период года

DOI: 10.31857/S0044461821020146

Для обеспечения стабильной работы водоочистного оборудования могут быть использованы композиционные коагулянты-флокулянты, получаемые на базе традиционного реагентного хозяйства водоочистной станции [1]. В качестве сырья для получения композиционных реагентов можно рассматривать отходы различных производств как в виде самостоятельного сырья [2], так и в комбинации нескольких видов отходов [3]. Техническое решение при правильном подборе реагентов в композиции в пересчете на оксиды алюминия и кремния из природного сырья и зольных продуктов, которые содержат компоненты, такие как  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ , реализуется путем применения простого и быстрого способа получения низкоконцентрированного композиционного коагулянта-флокулянта на базе реагентного хозяйства водоочистной станции.

Необходимость проведения исследования нового композиционного реагента [4] в условиях холодного периода года продиктована тем, что при нормальных условиях он обладает значительной коагулирующей способностью по сравнению с традиционными алюмосодержащими коагулянтами. Именно это обстоятельство позволяет предположить, что такой эффект может быть сохранен при более низких температурах.

Цель работы — сравнительное исследование эффективности выделения из сточных вод лигносодержащих компонентов с помощью композиционного коагулянта-флокулянта и традиционного реагента  $Al_2(SO_4)_3$  в интервале температур 4–30°C и обоснование оптимальной дозы реагента для обеспечения надежной и качественной подготовки воды для ее целевого использования.

## Экспериментальная часть

Алгоритм исследования основан на методике пробного коагулирования [5], которая предполагает оценку коагулирующей способности реагента в широком диапазоне pH при выбранной дозе коагулянта.

Для сравнения эффективности коагуляционно-го удаления примесей из воды использовался традиционный коагулянт в виде водного раствора  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ \* (ч.д.а., АО «ЛенРеактив») и низкоконцентрированный композиционный коагулянт-флокулянт [3, 6], полученный на основе нефелинового концентрата\*\* путем кислотного вскрытия 5%  $H_2SO_4$ \*\*\* (х.ч., АО «ВЕКТОН»). Процесс подготовки реагента композиционного коагулянта-флокулянта осуществлялся согласно [4]. Подготовленную суспензию, состоящую из нерастворимой фракции — замутнителя и раствора, в состав которого переходят  $Al^{3+}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и другие микроэлементы, характерные для нефелинового концентрата, отстаивали и в сравнительном исследовании использовали только осветленную часть композиции коагулянта-флокулянта.

Рабочие растворы как композиционного коагулянта-флокулянта, так и традиционного коагулянта хранили при pH ~2.0, что соответствует значению pH, при котором в раствор переходят и сохраняются в гидролизованном виде ионы алюминия, железа, титана [7], а также активная кремниевая кислота в виде мономера [8]. Полученный раствор относительно стоек и может храниться без видимого гелирования до 2 недель [9].

Рабочие концентрации обоих реагентов определяли по содержанию алюминия с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой\*\*\*\* в аккредитованной лаборатории ЗАО «РАЦ МИА» (спектрофотометр эмиссионный с индуктивно связанной плазмой серии iCAP 6300).

Для оценки эффективности коагулирующей способности реагентов был создан модельный раствор,

где в качестве маркерного вещества использовали лигнин, который часто встречается как загрязняющая примесь в сточных водах целлюлозно-бумажной промышленности, а также в водных объектах Северо-Западного региона. Лигнин входит в состав аллохтонного органического вещества, поступающего в водоем с водосборной территории [10], в том числе со сточными водами. Природное аллохтонное органическое вещество представлено в основном соединениями гумусовой природы, лигнин по своему коллоидно-химическому поведению в водных системах похож на эти соединения, поэтому он достаточно часто используется для исследования процессов коагуляции в качестве модельной примеси [11–13].

Раствор сульфатного лигнина концентрацией  $1 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$  готовили путем растворения в 0.01 М растворе NaOH (ч.д.а.) сухой навески лигнина, предварительно выделенного из раствора черного щелока Сегежского ЦБК путем подкисления [14]. Рабочие растворы сульфатного лигнина с заданной цветностью  $500^\circ\text{ХКШ}$  готовили методом разбавления. Цветность воды до и после процесса коагуляции определяли спектрофотометрическим методом,\*\*\*\*\* по изменению этого контрольного параметра определялась эффективность работы коагулянтов.

Пробы с модельным раствором подвергали термостатированию в интервале температур 4–30°C при исследовании процесса коагуляции. Измерение pH системы выполняли с учетом температурной компенсации в автоматическом режиме (иономер И-160МИ\*\*\*\*\*), погрешность измерения pH  $\pm 0.02$ , температуры  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Исследования проводили с помощью метода планированного эксперимента с целью построения математической модели процесса и выявления оптимальных областей эффективной очистки на примере сульфата алюминия и композиционного коагулянта-флокулянта. Применимость метода планированного эксперимента к исследованию условий коагуляции обсуждалась в работах [15, 16]. В данной работе был применен ротабельный центральный композиционный план второго порядка для трех факторов согласно методике [16]. В качестве факторов использовали концентрацию коагулянта (в расчете на активную концентрацию по  $Al^{3+}$  в системе), значение величины pH после введения реагентов и температуру проведе-

\* ГОСТ 3758–75. Реактивы. Алюминий сернокислый 18-водный. Технические условия.

\*\* ГОСТ Р 58220–2018. Руды нефелиновые небогатые. Технические условия.

\*\*\* ГОСТ 4204–77. Реактивы. Кислота серная. Технические условия.

\*\*\*\* ГОСТ Р 54921–2012. Концентраты цинковые. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Определение меди, свинца, кадмия, железа, алюминия, кобальта, сурьмы, марганца, мышьяка и индия.

\*\*\*\*\* ГОСТ 31868–2012. Вода. Методы определения цветности.

\*\*\*\*\* ГОСТ 22261–94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. ТУ 4215-053-89650280–2009. Иономеры лабораторные И-160МИ.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов при ротатабельном планировании второго порядка

Фактор	Уровень факторов					
	изменение фактора ( $\Delta x$ )	величина «звездного плеча» ( $-\alpha$ )	нижний предел ( $-1$ )	основной уровень ( $0$ )	верхний предел ( $+1$ )	величина «звездного плеча» ( $+\alpha$ )
Температура ( $x_1$ )	10	-1.8	5	15	25	31.82
Концентрация ( $x_2$ )	10	3.18	10	20	30	36.82
pH ( $x_3$ )	3	0.9	3	6	9	11.05

ния эксперимента. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

Исходные показатели качества воды: температура  $15^\circ\text{C}$ , концентрация алюмосодержащих компонентов  $20 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ , pH 6.0. Выходным параметром являлась цветность, по величине которой определялась эффективность удаления сульфатного лигнина из модельных систем после обработки реагентами и предварительного отстаивания в течение 30 мин в широком диапазоне pH при определенной концентрации коагулянта по активному алюминию и температуре раствора.

### Обсуждение результатов

При использовании модифицированной методики пробного коагулирования были определены возможные механизмы взаимодействия компонентов системы, а также оптимальные условия процесса при использовании конкретного реагента или композиции. Так как коагуляция представляет собой многофакторный процесс, то исследования коагулирующей способности алюмосодержащих реагентов проводили в интервале концентраций по активному алюминию  $10\text{--}30 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ , который был предварительно определен согласно методикам [4, 17], в широком диапазоне pH,

при температурах  $4\text{--}30^\circ\text{C}$ , диапазон значений которых обусловлен сезонными колебаниями температуры воды, которая подается на водоочистные сооружения.

Экспериментальные данные (табл. 2) позволили получить статистические модели, связывающие значения выходных параметров с заданными условиями. Адекватность моделей оценивалась по критерию Фишера.

Были получены уравнения регрессии, описывающие поведение модельной системы при влиянии таких факторов, как температура, концентрация алюмосодержащего компонента и pH. На основе расчетной матрицы (табл. 2) были построены поверхности отклика, которые демонстрируют, как влияют режимные параметры на выходные характеристики системы (рис. 1–3). Как следует из результатов исследования, температура и pH системы оказывают существенное влияние на эффективность очистки, а фактор концентрации алюмосодержащего реагента в заданных условиях незначим.

Как и следовало ожидать [13], параметры pH и концентрация коагулянта  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  оказывают существенное влияние на изменение цветности системы. Поверхность отклика (рис. 1) описывает снижение цветности по мере роста температуры в области pH 3.5–6.5, в которой присутствуют ги-

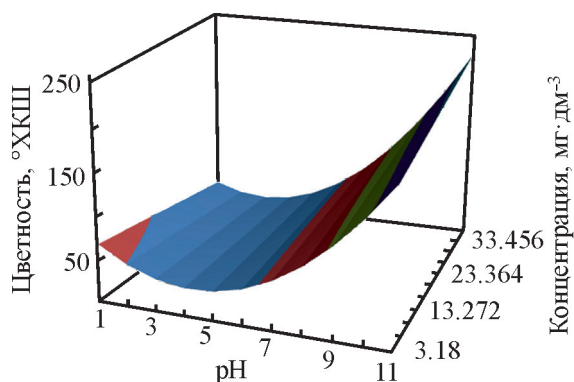


Рис. 1. Влияние концентрации активного алюминия и pH системы на цветность модельной системы при использовании  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  при  $T = 15^\circ\text{C}$ .

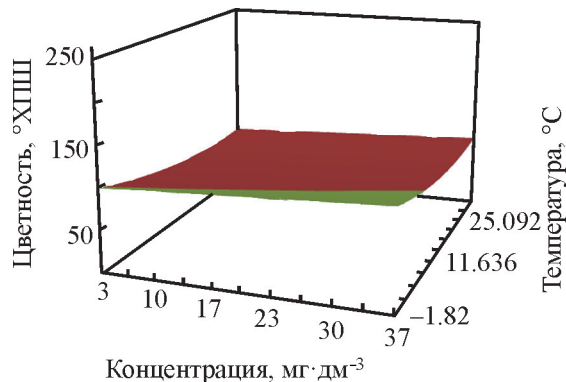


Рис. 2. Влияние концентрации коагулянта и температуры на цветность модельной системы при использовании  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  при pH 6.

Таблица 2

Расчетная матрица для композиционного плана второго порядка для трех факторов

Уровень факторов в кодированных переменных			Выходной параметр (цветность)	
температура ( $x_1$ )	концентрация ( $x_2$ )	pH ( $x_3$ )	композиционный коагулянт-флокулянт	$Al_2(SO_4)_3$
-1	-1	-1	26	61
1	-1	-1	14	24
-1	1	-1	25	36
1	1	-1	19	24
-1	-1	1	96	120
1	-1	1	85	100
-1	1	1	120	140
1	1	1	80	120
$-\alpha$	0	0	32	64
$+\alpha$	0	0	25	50

Уровень факторов в кодированных переменных			Выходной параметр (цветность)	
$x_1$	$x_2$	$x_3$	композиционный коагулянт-флокулянт	$Al_2(SO_4)_3$
0	$-\alpha$	0	36	43
0	$+\alpha$	0	15	35
0	0	$-\alpha$	18	35
0	0	$+\alpha$	120	220
0	0	0	35	40
0	0	0	25.4	42
0	0	0	38	43
0	0	0	22.3	45
0	0	0	34	51
0	0	0	38	52

дрозированные формы алюминия, активно взаимодействующие с лигнином. В этой области pH обеспечивается снижение цветности до требуемых показателей, которые нормируются для предпри-

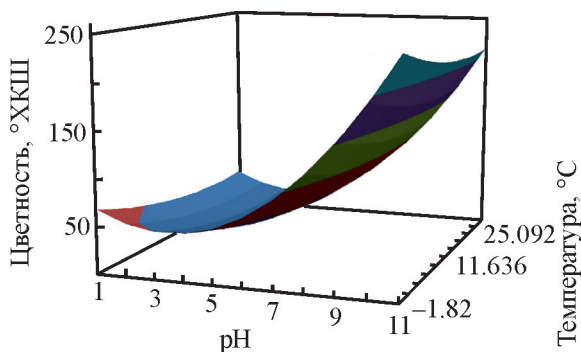


Рис. 3. Влияние температуры и pH на цветность модельной системы при использовании  $Al_2(SO_4)_3$  при концентрации  $20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  по активному  $Al^{3+}$ .

ятий [15]. При более высоких значениях pH, где алюминий существует в виде аквакомплексов и алюминатных форм, происходит существенное повышение цветности системы. Отрицательно заряженные формы алюминия не позволяют снизить концентрацию загрязняющих веществ, так как в этой области pH они имеют одноименный заряд с коагулянтом. Следует отметить, что эта область pH (т. е.  $pH < 8$ ) не представляет практического интереса как для технологии водоподготовки,\* так и для очистки сточных вод,\*\* так как в этой области pH

\* ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.

\*\* Методика определения основных технологических параметров сооружений систем водоснабжения и водоотведения, очистки сточных вод и обработки осадка. Раздел 2. Т. 2. Водоотведение, очистка сточных вод и обработка осадка. М.: ТКГруппа, 2014. 356 с.

присутствующие алюминатные формы не взаимодействуют с лигногуминовыми веществами [17].

В исследованном диапазоне концентраций  $Al_2(SO_4)_3$  (рис. 2) при pH 6 отмечается незначительное влияние температуры на эффективность обесцвечивания воды (поверхность отклика имеет незначительный уклон в сторону увеличения температуры), поэтому для данной модели этот фактор можно считать незначимым (фактор  $x_2$  может быть исключен из уравнения). Следует подчеркнуть, что цветность при низких температурах возрастает при увеличении концентрации реагента. Однако нельзя исключить тот факт, что при других условиях исследования процесса (например, при более высоких концентрациях реагента) этот фактор может быть значимым. На практике при очистке воды прибегают к увеличению концентрации реагента [17].

Влияние температуры и pH на цветность модельной системы при использовании  $Al(SO_4)_3$  при концентрации  $20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  по активному  $Al^{3+}$  более существенно, о чем свидетельствует поверхность отклика (рис. 3). В технологии физико-химической очистки воды наибольшую сложность представляют колебания значений температуры на входе в очистное оборудование. При понижении температуры (например, при колебаниях температуры окружающей среды и при отсутствии в технологии стадии предварительного подогрева) снижается активность алюмосодержащих реагентов [18, 19], что не позволяет обеспечить значения требуемых параметров качества воды на этой стадии очистки. Принято считать, что процесс быстрой агрегации частиц [19, 20] при низкой температуре замедляется. Полученные зависимости демонстрируют снижение цветности при понижении температуры даже в области pH от 5 до 7 единиц. При увеличении температуры повышается скорость гидролиза алюмосодержащих компонентов, что способствует увеличению скорости формирования и отделения твердой фазы, что в конечном счете ускоряет процесс коагуляции лигниносодержащих примесей. Процесс поддержания оптимальной температуры будет требовать дополнительных мероприятий, что существенно удорожает процесс очистки. В случае отсутствия таких мер возникает необходимость доочистки воды при вынужденном увеличении дозы реагента.

Понижение температуры воды в очистном оборудовании также приводит к уменьшению биохимической эффективности микроорганизмов активного ила и, как следствие, к росту остаточных концентраций загрязняющих веществ в очищенных сточных водах на 20–40%, т. е. снижению эффективности очистки [21].

Исследование процесса коагуляции в присутствии композиционного коагулянта-флокулянта в равных условиях показало, что остаточные концентрации лигногуминовых веществ, обуславливающих цветность системы, меньше, чем при использовании  $Al_2(SO_4)_3$ , причем остаточная цветность соответствует допустимым значениям\* и мало изменяется в интервале pH 2.0–8.0 (рис. 4–6).

При использовании композиционного коагулянта-флокулянта эффективное снижение цветности проявляется в более широком диапазоне pH, о чем свидетельствует поверхность отклика, представленная на рис. 4. Однако необходимо учесть, что фактор концентрации является незначимым в заданном диапазоне. Снижение цветности можно объяснить наличием в составе композиционного коагулянта-флокулянта помимо алюминия других компонентов, обладающих коагулирующей способностью, например кремния, титана, кальция, железа, которые, согласно правилу Шульца–Гарди, обладают коагулирующей способностью, что создает дополнительный устойчивый эффект осветления с образованием крупных хлопьев, хорошо седиментирующих в технологическом оборудовании [3, 7, 22, 23].

Присутствие кремниевой кислоты способствует полимеризации и более быстрому образованию агрегатов и их седиментации [22]. Это гарантирует высокую эффективность работы очистного оборудования в интервале pH 6.0–8.0, который является наиболее оптимальным как для сброса, так и для передачи воды на стадию биологической очистки, причем без превышения остаточного алюминия в очищенной воде. При значении  $pH \geq 8.0$  отмечается увеличение остаточной цветности, но она значительно ниже, чем в случае использования традиционного реагента.

При исследовании влияния концентрации алюминия в составе композиционного коагулянта-флокулянта (рис. 5) и температуры при pH 6 на остаточную цветность модельной воды отмечается незначительное изменение этих факторов. Поверхность отклика имеет практически горизонтальную плоскость, что свидетельствует о стабильной работе реагента во всем диапазоне концентраций. Эффект стабильной работы композиционного коагулянта-флокулянта обеспечивается наличием соединений алюминия и кремния, которые специфическим образом взаимодействуют с загрязняющими веществами, образуя новые органоминеральные соединения. Способность этих двух компонентов образовывать пространствен-

\* ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.

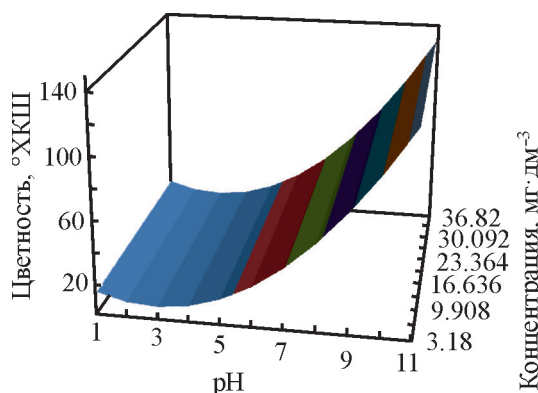


Рис. 4. Влияние концентрации коагулянта и рН системы на цветность модельной системы при использовании композиционного коагулянта-флокулянта при  $T = 15^\circ\text{C}$ .

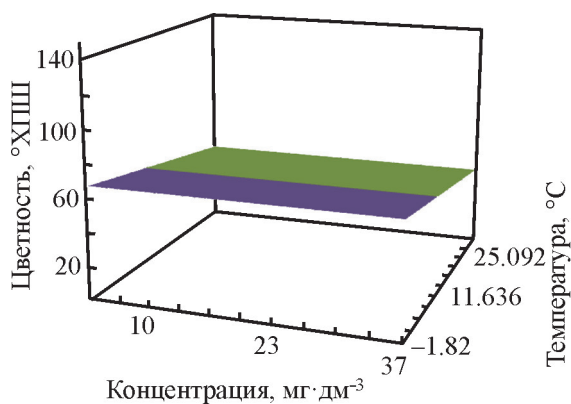


Рис. 5. Влияние концентрации коагулянта и температуры на цветность модельной системы при использовании композиционного коагулянта-флокулянта при рН 6.

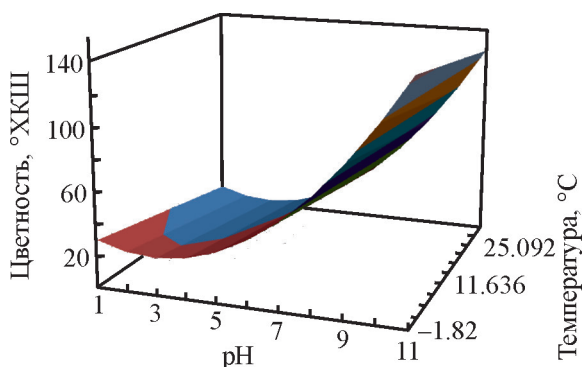


Рис. 6. Влияние рН и температуры системы на цветность модельной системы при использовании композиционного коагулянта-флокулянта при концентрации  $20 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  по активному  $\text{Al}^{3+}$ .

ные структуры с присутствующими органическими веществами в воде отмечается в ряде работ [6, 22]. Таким образом, использование композиционного

коагулянта-флокулянта имеет явное преимущество по эффективному снижению цветности исследуемой системы при всех исследуемых температурах. Эффективность действия композиционного коагулянта-флокулянта снижается в щелочной среде (рис. 6), где алюминий будет находиться в виде сложных аквакомплексов, не взаимодействующих с сульфатным лигнином, что приводит к повышению цветности модельной системы.

Необходимо также отметить, что наличие соединений кальция и титана в составе нефелинового концентрата позволяет снизить устойчивость системы в результате взаимодействия с лигнином. Наиболее эффективно этот процесс происходит, когда в систему вводят не осветленную часть композиционного коагулянта-флокулянта, а его суспензию. Однако в этом случае необходимо введение дополнительных факторов, учитывающих концентрацию замутнителя в системе и его влияние на гетерокоагуляционные процессы в ней.

## Выводы

Исследование методом планируемого эксперимента позволило получить адекватные модели оценки эффективности коагулирующей способности алюмосодержащих реагентов. В работе показано, что коагулирующая способность алюмосодержащих коагулянтов при соизмеримых дозах по активному алюминию может существенно различаться при разных значениях рН.

Установлено, что композиционный низкоконцентрированный коагулянт-флокулянт, содержащий в своем составе соединения не только алюминия, но и кремния, титана, кальция, железа, обладает технологическим преимуществом в обеспечении стабильной работы очистного оборудования за счет высокой эффективности процесса коагуляции в интервале рН 6.0–8.0 при более низком содержании алюминия. Следует также отметить, что коагулирующая способность сохраняется при варьировании температуры от 4 до  $30^\circ\text{C}$ , что является важным критерием для практического применения.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность Комитету по науке и высшей школе Санкт-Петербурга за признание данного направления исследований как проект-победитель в номинации «Лучшая научно-инновационная идея» в конкурсе лучших инновационных проектов в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга в 2019 году.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

Дягилева Алла Борисовна, д.х.н., проф.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>  
Смирнова Анастасия Игоревна, к.х.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-1490>

### Список литературы

- [1] Кузин Е. Н., Кричинина Н. Е. Отвержденный алюмокремниевый флокулянт-коагулянт — новый реагент для водоочистки // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18. С. 78–81.
- [2] Пат. РФ 2588535 (опубл. 2016). Способ получения алюмокремниевых флокулянт-коагулянт.
- [3] Пат. 2656305 (опубл. 2018). Способ получения низкоконцентрированного композиционного коагулянт-флокулянт на основе нефелинового сырья и золы.
- [4] Смирнова А. И., Дягилева А. Б., Присмакова А. Е. Технология получения низкоконцентрированного композиционного коагулянт-флокулянт // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 11. С. 1633–1641.  
<https://doi.org/10.1134/S0044461818110142>  
[Smirnova A. I., Dyagileva A. B., Prismaikova A. E. Technology for obtaining low-concentration composite coagulant-flocculant // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 11. P. 1839–1846.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427218011150>].
- [5] Lorentsson A. V., Chernoberezhskii Y. M., Dyagileva A. B. Determination of the optimal conditions for the coagulation-based water purification using modified coagulation test // Коллоид. журн. 2002. Т. 64. № 1. С. 94–96 [Lorentsson A. V., Chernoberezhskii Y. M., Dyagileva A. B. Determination of the optimal conditions for the coagulation-based water purification using modified coagulation test // Colloid J. 2002. T. 64. N 1. P. 87–89].
- [6] Смирнова А. И., Дягилева А. Б. Механизм формирования органоминеральных структур на основе сульфатного лигнина и алюмосодержащих компонентов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2011. № 6. С. 112–118.
- [7] Назаренко В. А., Антонович В. П., Невская Е. М. Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. М.: Атомиздат, 1979. С. 48–61.
- [8] Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Основы золь-гель технологии кремнезема. М.: ИКЦ Академкнига, 2004. С. 154–163.
- [9] Веляев Ю. О., Захаров В. И., Майоров Д. В. Совершенствование технологии флокулянт на основе нефелина // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. №5. С. 129–135.
- [10] Лозовик П. А., Мусатова (Зобкова) М. В., Рыжиков А. В. Автохтонное и аллохтонное органическое вещество в разнотипных озерах Карелии // Вода: химия и экология. 2014. № 4. С. 11–17.
- [11] Морева Ю. Л., Чернобережский Ю. М. Исследование ультрафильтрационного выделения сульфатного лигнина из его разбавленных водных растворов в присутствии  $Al_2(SO_4)_3$  // ЖПХ. 2010. Т. 83. № 12. С. 1978–1981 [Moreva Y. L., Chernoberezhskii Y. M. Study of ultrafiltration recovery of sulfate lignin from its dilute aqueous solutions in the presence of  $Al_2(SO_4)_3$  // Russ. J. Appl. Chem. 2010. V. 83. N 12. P. 2106–2109.  
<http://doi.org/10.1134/S1070427210120074>].
- [12] Лигнины (структура, свойства и реакции) / Под ред. К. В. Сарканена, К. Х. Людвиг. М.: Лесн. пром-сть, 1975. С. 38–53.
- [13] Чернобережский Ю. М., Атенесян А. А., Дягилева А. Б., Лоренцсон А. В., Лещенко Т. В. Влияние концентрации сульфатного лигнина на эффективность его коагуляционного выделения из водных растворов электролитов // ЖПХ. 2002. Т. 75. № 7. С. 1189–1192 [Chernoberezhskii Yu. M., Dyagileva A. B., Atanesyan A. A., Leshchenko T. V. Influence of the kraft lignin concentration on the efficiency of its coagulation recovery from aqueous electrolyte solutions // Russ. J. Appl. Chem. 2002. V. 75. N 7. P. 1166–1169.  
<http://doi.org/10.1023/A:1020741019151>].
- [14] Radoykova T., Nenikova S., Valchev I. Black liquor lignin products, isolation and characterization // J. Chem. Technol. Metal. 2013. V. 48 (5). P. 524–529.
- [15] Birjandi N., Younesi H., Bahramifar N. Treatment of wastewater effluents from paper-recycling plants by coagulation process and optimization of treatment conditions with response surface methodology // Appl. Water Sci. 2016. V. 6. N 4. P. 339–348.  
<https://doi.org/10.1007/s13201-014-0231-5>
- [16] Седова Е. Л., Воронцов К. Б., Буркова С. А. Влияние условий коагуляционной обработки на эффективность очистки лигнинсодержащей сточной воды по данным планированного эксперимента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 159–167.  
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.159>
- [17] Бойкова Т. Е., Богданович Н. И., Воронцов К. Б. Эффективность применения коагулянтов при водоподготовке в целлюлозно-бумажной промышленности в условиях Севера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 141–152.  
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.141>
- [18] Фомина В. Ф., Фомин А. В. Опыт эксплуатации напорных флотаторов при очистке маломутных

- цветных вод реки Вычегды // Водоснабжение и сан. техника. 2016. № 5. С. 9–16.
- [19] Драгинский В. А., Алексеева Л. П., Гетманцев С. В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: ГУП ВИМИ, 2005. С. 91–188.
- [20] Бабенков Е. Д. Очистка воды коагулянтами. М.: Наука, 1977. С. 23–156.
- [21] Пат. РФ 2033973 (опубл. 1995). Способ управления процессом очистки сточных вод.
- [22] Царьков А. Ю., Шабанова Н. А. Закономерности золь-гель процессов в щелочном коллоидном кремнеземе // Успехи в химии и хим. технологии. 2008. Т. 22. № 3 (83). С. 32–35.
- [23] Пат. РФ 2283286 (опубл. 2006). Нефелиновый коагулянт.
-