

Научная статья

УДК 628.345.4

DOI 10.46845/1997-3071-2022-66-53-64

Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах

Елена Викторовна Ульрих¹, Анна Сергеевна Баркова²

^{1,2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ elen.ulrich@mail.ru*, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

² anna.barkova@klgtu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2602-6810>

Аннотация. Чем выше влажность осадка, тем выше затраты на его дальнейшую переработку. Целью обезвоживания агломерированного шлама является снижение затрат на последующую сушку и транспортировку. Работа посвящена изучению параметров флокуляции сточных вод катионными флокулянтами с последующим фильтрованием осадка на пресс-фильтрах. Для улучшения обезвоживания шлама использовали химические реагенты – катионные полиэлектролиты "Зетаг-7664", "Зетаг-7689" и "Зетаг-7692". Определяли скорость осаждения твердых частиц, флокулирующую способность и флокулирующий эффект, а также влажность осадка после фильтрования на пресс-фильтрах. Установлено, что наибольшей скоростью осаждения (7 мм/с), наибольшими флокулирующей активностью и флокулирующим эффектом (0,66 и 26,2, соответственно) обладает среднекатионный флокулянт "Зетаг-7689". Доказано, что после фильтрования наименьшую остаточную влажность имеет среднекатионный флокулянт "Зетаг-7689" (36 %). В высококатионном "Зетаг-7664" и низкокатионном "Зетаг-7692" отмечалась остаточная влажность после флокуляции и фильтрования – 39 и 37 %, соответственно. Остаточная влажность осадка, отфильтрованного на фильтр-прессе, соответствует технологическим требованиям. Выделение воды из этой структуры при фильтрации можно объяснить явлением капиллярности. Между частицами образуется мениск жидкости. В мениске с противоположной стороны жидкости капиллярные потенциалы направлены в противоположные стороны, но их абсолютные значения не равны. В результате жидкость движется по капилляру до тех пор, пока потенциалы не сравняются. Для достижения разумного обезвоживания осадка необходимо провести пробную флокуляцию, изучить процессы адсорбции полиэлектролитов на осадке, реологические свойства суспензий сточных вод и растворов флокулянтов. Необходимо выбрать и контролировать параметры фильтр-пресса.

Ключевые слова: сточные воды, флокулянты, фильтр-прессы, осаждение, осадок, катионные полиэлектролиты, обезвоживание

Для цитирования: Ульрих Е. В., Баркова А. С. Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 53–64.

Original article

Parameters of wastewater flocculation with subsequent filtration on press filters

Elena V. Ul'rikh¹, Anna S. Barkova²

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ elen.ulrich@mail.ru *, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

² anna.barkova@klgtu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2602-6810>

Abstract. The higher is the sludge moisture content, the higher are the costs for further sludge processing. Thus, agglomerated sludge is dehydrated in order to reduce the cost of its subsequent drying and transportation. The purpose of this research was to study the parameters of wastewater flocculation with cationic flocculants, followed by filtering the sludge on press filters. To improve the sludge dehydration, the following chemical reagents were used: cationic polyelectrolytes "Zetag-7664", "Zetag-7689" and "Zetag-7692". Settling velocity of solid particles, flocculating ability and flocculating effect have been determined. The moisture content of the sludge after filtration on press filters has been measured. It has been established that the highest settling rate (7 mm/s), the highest flocculating activity and flocculating effect (0.66 and 26.2, respectively) belong to the medium cationic flocculant "Zetag-7689". The lowest residual moisture content after filtration on press filters was shown by the medium cationic flocculant "Zetag-7689" (36 %). The high cationic flocculant "Zetag-7664" and the low cationic one "Zetag-7692" had residual moisture content after flocculation and press filtration of 39 and 37%, respectively. The residual moisture content of the sludge filtered on the filter press meets the technological requirements. The release of water from this structure during filtration can be explained by the phenomenon of capillarity. A liquid meniscus is formed between the particles. In the meniscus on the opposite side of the liquid, the capillary potentials are directed in opposite directions, but their absolute values are not equal. As a result, liquid moves through the capillary until the potentials are equal. To achieve reasonable dehydration of the sludge, it is necessary to carry out test flocculation as it allows studying the processes of polyelectrolyte adsorption on the sludge, the rheological properties of wastewater suspensions and flocculant solutions. It is obligatory to select and control filter press parameters.

Key words: wastewater, flocculants, filter presses, settling, sludge, cationic polyelectrolytes, dehydration

For citation: Ulrikh E. V., Barkova A. S. Parameters of wastewater flocculation with subsequent filtration on press filters. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(66):53–64.(in Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Осадки сточных вод представляют собой многокомпонентную смесь, состоящую в основном из воды (95 %), органических соединений, микроорганизмов и коллоидов. Высокое содержание воды в осадке способствует большим затратам на его дальнейшую обработку. Кроме того, из-за свойств шлама могут возникнуть проблемы, связанные с его окончательной утилизацией [1]. Процесс очистки на очистных сооружениях включает в себя обезвоживание и фильтрование осадка и

направлен на уменьшение его гидратации и объема, а также для облегчения дальнейшей переработки осадка, обеспечения экономической целесообразности при утилизации шлама [2]. Учитывая водоудерживающую способность осадка сточных вод и механическое обезвоживание, гидратация осадка может варьировать от 95–99 до 65–85 % [3]. Без использования синтетических полимеров (флокулянтов) и процесса фильтрования даже правильно спроектированные и эксплуатируемые механические обезвоживающие устройства не гарантируют высокой эффективности [4].

Термин "полиакриламид" широко используется для описания любого полимера, в котором акриламид присутствует в качестве одного из мономеров. Более строго, его номенклатура IUPAC – поли(проп-2-енамид), что определяет его как водорастворимый полимер, образованный полимеризацией либо мономеров акриламида, либо N, N'-метилденбис(акриламида). Полиакриламид, содержащий только акриламидные мономеры, является неионогенным; другие мономеры, такие как акрилат или 2-акриламидо-2-метилпропансульфонат, могут быть сополимеризованы в различных процентных соотношениях с образованием анионного полиакриламида; 1, 4 диметилдиаллиламмоний, этанаминий (N,N,N-триметил-2-((1-оксо-2-пропенил)окси) и 1,2-диметил-5-винилпиридин – обычные сомономеры для катионного полиакриламида.

Гидролизованная форма полиакриламида, сополимера акриламида и акриловой кислоты, является наиболее широко используемым анионным полиакриламидом при разработке месторождений нефти и газа, а также для кондиционирования почвы. Самый распространенный коммерческий состав полиакриламида в нефтегазовой промышленности представляет собой эмульсию вода-в-масле, в которой полимер растворен в водной фазе, инкапсулированной непрерывной масляной фазой, стабилизированной поверхностно-активными веществами.

Существует много способов изменить структуру осадка в процессе осаждения. Однако самый распространенный метод на многих очистных сооружениях – использование неорганических и органических коагулянтов и флокулянтов [5]. Модельный алгоритм для расчета наиболее выгодной дозы полиэлектролитов или других химических реагентов, обеспечивающих наилучшие обезвоживающие эффекты, разработан слабо [2]. Для снижения расхода химических реагентов флокулянты модифицируют и исследуют новые методы фильтрования осадков после флокуляции [6]. Коагулянты и флокулянты могут изменить структуру шлама и повысить его сжимаемость.

На очистных станциях применяются следующие методы обезвоживания: дренаж, представляющий собой истечение воды под собственным весом; обезвоживание под действием вибрации собственного веса; центрифугирование – обезвоживание в центрифуге; отстаивание–сжатие в различных отстойниках; обезвоживание в гидроциклоне; фильтрацию через пористую мембрану; естественную сушку в складских условиях [4].

Целью обезвоживания агломерированного шлама является снижение затрат на последующую сушку и транспортировку. В зависимости от характера влажного осадка и его жидкой фазы используются различные методы фильтрации и обезвоживания, например, вакуумный фильтр (вакуум создается под пористой перегородкой) или фильтр-пресс (давление на сырье подается сверху).

Степень обезвоживания при этом зависит от сопротивления осадка движению потока жидкости, свойств твердых частиц, жидкой фазы суспензии и условий фильтрации. Структура осадка определяется гидродинамическими факторами, пористостью осадка, размером и смачиваемостью составляющих его частиц [2, 6]. Известно влияние физико-химических факторов на осадочные структуры: степень коагуляции или флокуляции, наличие сольватных оболочек и др. Степень воздействия гидродинамических и физико-химических факторов определяется размером частиц, с их увеличением возрастает влияние гидродинамических факторов, с уменьшением – физико-химических и химических [7]. Повышение скорости фильтрации влияет на гидродинамические факторы, увеличивая перепад давления (сила движения процесса) на поверхности фильтра и уменьшая сопротивление образующегося осадка. Отделение твердого вещества от жидкости с помощью фильтр-прессов представляет собой сложный процесс, на фильтрацию влияют условия образования суспензии и ее обработки. Эти факторы позволяют многократно изменять сопротивление осаждению. Предварительная обработка суспензии флокулянтами увеличивает пористость осадка, что облегчает его фильтрацию [8].

Цель данной работы – изучение параметров флокуляции сточных вод катионными флокулянтами с последующим фильтрованием осадка на пресс-фильтрах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

МЕТОДЫ

Для исследования использовали осадок сточных вод с городских очистных сооружений вместимостью 40 000 м³. Осадок собирали на механических станциях обезвоживания перед флокуляцией. Все испытания проходили в трех повторностях. Было отобрано девять проб обводненного осадка по 500 мл. Для обеспечения надлежащих условий процесса образцы шлама хранились в холодильнике при температуре 4⁰С и подогревались до комнатной температуры перед использованием. Параметры осадка: рН – 7,98, удельное фильтрующее сопротивление – $2,52 \times 10^{13}$ м/кг, влажность – 97,8 %, цвет – серо-черный, запах – сырого торфа. Для улучшения обезвоживания шлама использовали химические реагенты – катионные полиэлектролиты "Зетаг-7664", "Зетаг-7689" и "Зетаг-7692", которые представляют собой полиакриламидные полимеры и четвертичные катионные мономеры. Концентрация катионных флокулянтов составляла 0,1 %. Образцы перемешивали с помощью магнитной мешалки "Biosan MMS-3000N" со скоростью 60–100 об./мин.

Процесс осаждения взвешенных частиц осуществлялся по данному методу определения скорости осаждения твердых частиц в присутствии катионного флокулянта. Измеряли высоту спрессованных отложений в цилиндре, в который добавляли полиэлектролит.

Скорость осаждения (V_{oc}) (мм/с) рассчитывали по формуле:

$$V_{oc} = \frac{100}{t},$$

где 100 – расстояние между метками в цилиндре, мм.

Флокулирующий эффект флокулянтов оценивали по относительному безразмерному параметру D :

$$D = 1 - \frac{V_0}{V},$$

где V_0 и V – средние скорости осаждения дисперсной фазы без флокулянтов и в присутствии катионных флокулянтов, соответственно.

Для количественной оценки эффективности действия катионных флокулянтов по сравнению с исходными образцами осаждаемых шламов использовали величину λ – флокулирующую активность:

$$\lambda = \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \cdot \frac{1}{C} = \frac{D}{C},$$

где C – концентрация полимера, %.

После флокуляции осадки фильтровали на фильтр-прессах, затем определяли их влажность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перед проведением эксперимента была выдвинута гипотеза, что явное преимущество в процессе обезвоживания и флокуляции будет иметь бисерный флокулянт "Зетаг-7689". Это объясняется тем, что непористый дисперсный материал химически взаимодействует с обводненным осадком сточных вод только верхней, незначительной площадью поверхности частиц, в то время как бисерные микропористые флокулянты контактируют с осадком внешней и внутренней (в сотни раз большей, чем внешняя площадь контактов) поверхностями частиц, в результате чего силы удерживания бисерным материалом значительно выше, чем непористым, что способствует повышению степени флокуляции и обезвоживания осадка [9].

Согласно классификации П. А. Ребиндера гелеобразные растворы флокулянтов относятся к коагуляционным (тиксотропно-обратимым) структурам, в которых его макромолекулы точно контактируют друг с другом за счет сил Ван-дер-Ваальса через жидкие прослойки или через их вытеснение. При этом образуются рыхлые каркасы из цепочек и агрегатов. Это явление характеризует специфическое свойство коагуляционных структур – тиксотропию, которая наиболее проявляется при течении гелеобразных растворов, представляющих собой пластичные системы в отличие от непластичных (идеально вязких систем). Образцово подходит под классификацию П. А. Ребиндера среднекатионный флокулянт "Зетаг-7689".

Установлено, что "Зетаг 7689" имеет среднюю молекулярную массу и среднюю (50 %) степень гидролиза. Известно, что половина макромолекул этого флокулянта находится в глобулярном состоянии, а половина – в фибриллярном. Такая структура способствует наилучшей адсорбции флокулянта на частицах суспензии осадка сточных вод, а значение молекулярной массы ММ (около 15 млн) обуславливает повышенную скорость осаждения частиц, тогда как у слабокатионного "Зетаг-7692", имеющего более свернутую структуру со степенью его ионизации до 30 %, величина адсорбции на частицах суспензии ниже, что можно объяснить более низкой ММ (около 10 млн). Молекулы "Зетаг-7664", наоборот,

развернуты в отдельные нити (степень ионизации 70 %), и осаждение взвешенных частиц происходит быстрее, при этом осадок имеет более плотную структуру. Осаждение частиц суспензии можно объяснить с позиций теории ДЛФО (Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека). Устойчивость и коагуляция связаны непосредственно с взаимодействием частиц дисперсной фазы между собой или с какими-либо поверхностями. Это взаимодействие определяет адгезию частиц к макроповерхностям и структурообразование в дисперсных системах. Поэтому в основе теории лежит соотношение между силами притяжения и отталкивания. На малых и больших расстояниях между частицами преобладает энергия притяжения, а на средних – энергия электростатического отталкивания. Первичный минимум соответствует непосредственному слипанию частиц, а вторичный – их притяжению через прослойку среды. Максимум на средних расстояниях характеризует потенциальный барьер, препятствующий слипанию частиц. Силы взаимодействия могут распространяться на расстояния до сотен нанометров, максимальное значение энергии достигает 10^{-2} Дж/м² и более. В исследуемых системах осадков сточных вод в процессе флокуляции присутствует достаточно высокий потенциальный барьер, а также широкий и глубокий вторичный минимум. В системе происходит быстрая флокуляция частиц на расстояниях, соответствующих вторичному минимуму. Благодаря наличию потенциального барьера частицы во флокулах не имеют непосредственного контакта и разделены прослойками среды. Во вторичном минимуме наблюдается явление тиксотропии, совмещенное со стадией синерезиса [13].

Электростатический фактор устойчивости характерен для наиболее распространенных систем с водными средами, создающими условия для диссоциации. Механизм образования электростатического барьера связан с механизмом образования двойного электрического слоя: поверхностная диссоциация вещества частиц, адсорбция электролитов, в том числе ионогенных поверхностно активных веществ и высокомолекулярных соединений, и ориентирование диполей молекул растворителя или растворенных веществ. Так как электростатический барьер определяется, главным образом, электрическим потенциалом и толщиной двойного электрического слоя, то, очевидно, он будет возрастать с увеличением поверхностной диссоциации, количества адсорбируемых потенциалопределяющих ионов и прочности их закрепления, а также с уменьшением взаимодействия противоионов с поверхностью (увеличение двойного слоя). При наличии на поверхности функциональных групп флокулянтов, обладающих слабыми кислотными свойствами, значение потенциала и, соответственно, потенциального барьера зависит от pH среды [6].

Полученные в процессе флокуляции осадков сточных вод данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Флокулирующие и загущающие свойства катионных флокулянтов на осадках сточных вод

Table 1. Flocculating and thickening properties of cationic flocculants on sewage sludge

Параметр	Катионные флокулянты		
	"Зетаг-664"	"Зетаг-7689"	"Зетаг-7692"
Скорость осаждения, мм/с	9	7	10
Высота осадка, мм	40	35	42
Влажность осадка после флокуляции, %	72	58	66
Флокулирующий эффект (D)	0,57	0,66	0,56
Флокулирующая активность (λ)	22,8	26,2	22,5

Как видно из данных, наибольшую скорость седиментации показывает среднекатионный флокулянт "Зетаг-7689" (7 мм/с). Этот факт можно объяснить молекулярной массой флокулянта, катионной природой, свернутостью макромолекулярных глобул и адсорбционным взаимодействием флокулянта с частицами осадка. Благодаря повышенной адсорбционной активности "Зетаг-7664" с высокой молекулярной массой образуются крупные, быстро оседающие хлопья. При этом высота осадка самая низкая (35 мм), так как происходит ускоренное выделение влаги и осадок обезвоживается и спрессовывается. Из-за быстрого и более полного отделения жидкости влажность осадка после флокуляции для среднекатионного "Зетаг-7689" наиболее низкая (58 %). На процесс быстрой флокуляции влияет наличие невысокого электростатического барьера в случае использования среднекатионного "Зетаг-7689". От скорости осаждения частиц зависят кинетические характеристики: флокулирующий эффект и флокулирующая активность. Для "Зетаг-7689" данные характеристики наибольшие – 0,66 и 26,2, соответственно. Для "Зетаг-7664" скорость осаждения частиц несколько ниже – 9 мм/с, высота осадка – 40 мм из-за более медленного и менее интенсивного обезвоживания. По этой причине при использовании "Зетаг-7664" влажность осадка после флокуляции имела наибольшее значение – 72 %, при этом снизились кинетические характеристики процесса флокуляции, флокулирующий эффект и флокулирующая активность составили 0,57 и 22,8, соответственно.

Полиэлектролит "Зетаг-7692" обладает самой низкой скоростью осаждения и увеличенной высотой осадка (10 мм/с и 42 мм, соответственно). Были отмечены влажность осадка после флокуляции (66 %), наименьший флокулирующий эффект (0,56) и самая низкая флокулирующая активность (22,5).

"Зетаг-7689" наиболее эффективен для осветления суспензий сточных вод, поскольку макромолекулы образуют высоковязкую сетчатую структуру, что приводит к увеличению ММ и улучшению характеристик агрегации. Суспензии сточных вод при воздействии высококатионного "Зетаг-7664" и низкокатионного "Зетаг-7692" менее прозрачны, чем при воздействии "Зетаг-7689" со средним содержанием катионов.

Анализ полученных данных показывает, что Зетаг7689 имеет более высокую скорость адсорбции частиц осадка, чем Зетаг7664 и Зетаг7692. Процесс флокуляции происходит быстрее, а флокулянты Зетаг7689 имеют меньшую высоту осадка, чем другие флокулянты. Максимальное сжатие осадка с помощью Зетаг 7689 было в два раза больше, чем с Зетаг 7664 и Зетаг 7692. Уплотнение осадка и

повышение скорости осветления сточных вод ускоряют процесс концентрации осадка.

При исследовании качества осадков после флокуляции и фильтрования на пресс-фильтрах получены данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Свойства осадков после флокуляции и фильтрования
Table 2. Properties of sediments after flocculation and filtration Убрала отступ

Название флокулянта	Свойства осадка после флокуляции	Свойства осадка после фильтрования	Количество влаги, %
"Зетаг-7664"	Происходит образование рыхлого, разделяющегося на флокулы осадка	Происходит образование нелипкого, нерасслаивающегося осадка с частично отделяющейся влагой, сохраняющего форму	39
"Зетаг-7689"			36
"Зетаг 7692"			37

Из данных таблицы можно сделать вывод, что эффективность обезвоживания всех трех флокулянтов примерно одинакова. После первой стадии обезвоживания – флокуляции – происходит образование рыхлого, разделяющегося на флокулы, влажного осадка. После проведения стадии фильтрования на пресс-фильтрах частично обезвоженного осадка образуется нелипкий, нерасслаивающийся осадок с легким частичным отделением влаги. Осадок сохраняет форму и может быть вывезен на полигон или использован для последующей переработки в качестве топливных пеллет, удобрений и других побочных продуктов. Остаточная влажность осадка, отфильтрованного на фильтр-прессе, для "Зетаг-7689" составила 36, для "Зетаг-7664" – 39, для "Зетаг-7692" – 37 %. Данные значения остаточной влажности осадка сточных вод очистных сооружений соответствуют технологическим требованиям.

Полученные данные можно интерпретировать с двух точек зрения. Во-первых, загустевший осадок имеет зернистую структуру. Его частицы разобщены или контактируют слегка [9]. Выделение воды из этой структуры при фильтрации можно объяснить капиллярностью. Между частицами образуется мениск жидкости, в котором на противоположной стороне жидкости точки капиллярности разнонаправлены, но абсолютные значения не равны. Поэтому жидкость движется по капилляру до тех пор, пока потенциалы не сравниваются [10]. Таким образом, происходит самопроизвольное отделение жидкости. С другой стороны, отделение воды от осадка при фильтрации можно объяснить явлением разделения жидкости, которое зачастую характерно для гелеобразных структур, когда объем уменьшается до того, как среда естественным образом вытесняется из эластичных осадков. Внешнее давление на систему ускоряет выделение жидкости, по мере сближения частиц друг с другом и попадания в область действия силы начинается выдавливание воды. Причиной обезвоживания может быть образование дополнительных межмолекулярных связей, что приводит к сильному водоотделению [11]. Также расслоение жидкости возможно в случае, если система не достигла равновесия при образовании осадка, когда продолжается процесс, связанный с его установлением. Все вышеперечисленные признаки оказывают влияние на отделение воды, в результате чего качество полученного осадка отвечает технологическим требованиям [12, 13].

Хотя полиакриламид, используемый в экологических системах, имеет очень высокую ММ, хорошо известно, что он может подвергаться деградации с помощью различных механизмов. Значительная подвижность его ионов приводит к высвобождению мономера акриламида – известного токсина и потенциального канцерогена [3].

Механическая деградация чаще всего происходит при переработке нефти и газа из-за высоких скоростей сдвига и удлинения при турбулентном течении через небольшие поры и трещины в пористой среде в этих пластах. Разрыв цепи обычно случается на входе в узкие поры на поверхности песчаника, где напряжение при растяжении является максимальным, при этом полимерная цепь в основном разрывается вблизи средней точки. Чистый сдвиговый поток через поры или трещины, как правило, вызывает ограниченный разрыв цепи. Модельные эксперименты показали, что для деструкции полимера в чистом сдвиговом потоке требуется более чем в 100 раз большая скорость сдвига, нежели для потока через сетчатый фильтр, где присутствуют как продольные, так и сдвиговые потоки. Таким образом, ожидается ограниченная механическая деградация при закачке полиакриламида через штуцеры, клапаны и трещины, где скорость потока низкая; деградация должна быть выше при течении через призабойные зоны и перфорационные отверстия, где скорости значительно выше. Механическая деградация полиакриламида усиливается при высокой солености из-за изменения жесткости полимера в результате комплексообразования полимера с ионами [5].

Химическая деградация полиакриламида, приводящая к разрыву цепи, включает активацию полимера свободными радикалами, образующимися в окружающей среде в результате реакции Фентона. Данная реакция обусловлена взаимодействиями между кислородом, растворенными ионами Fe^{2+} и сульфатными радикалами посредством персульфатной активации. Гидроксильные радикалы также могут образовываться при обработке озоном и УФ-излучением. Установлено, что разрыв цепи, вызванный свободными радикалами, снижает ММ полиакриламида с 10^7 до 10^5 . Да в течение 24 ч при воздействии железосодержащего сланца ($1,5 \text{ мг/л } Fe^{2+}$) при 80°C . Инкубация 0,6 % полиакриламида с 30 мМ персульфата калия при 50°C вызывала снижение вязкости на 90 % за 2 ч. В этих исследованиях также было обнаружено, что свободнорадикальные реакции разрыва цепи имеют гораздо большую скорость в условиях повышенных температур. Термическое разложение полиакриламида (в отсутствие свободных радикалов) не вызывает существенного разрыва цепи, за исключением очень высоких температур порядка 300°C . Термическое разложение происходит в результате меж- или внутримолекулярного имидирования амидных групп с выделением аммиака и образованием нитрильных групп, а также в результате разрыва имидных / амидных групп с образованием газообразного азота и углекислого газа. Термическая деградация маловероятна в условиях окружающей среды, хотя температура играет важную роль в определении скорости химической и фотолитической деструкции [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований установлено, что полиэлектролиты являются важными техническими вспомогательными веществами в процессе флокуляции и фильтрования осадков сточных вод городских очистных сооружений.

В ходе исследований изучены параметры флокуляции осадков сточных вод катионными флокулянтами, флокулирующие и загущающие свойства катионных флокулянтов. Установлено, что наибольшими флокулирующими и загущающими свойствами обладает среднекатионный "Зетаг-7689". Скорость осаждения осадка под действием данного флокулянта составила 7 мм/с, высота осадка – 35 мм, влажность после флокуляции – 58 %, флокулирующий эффект и флокулирующая активность – 0,66 и 26,2, соответственно. Доказано, что обезвоживающие свойства всех трех флокулянтов примерно одинаковы. Количество остаточной влаги в осадке после фильтрования на пресс-фильтрах удовлетворяет требованиям технологического процесса.

Стандартной технической информации, такой как молекулярная масса, ионизация и химический состав, недостаточно для оптимального использования флокулянтов. Необходимо подобрать эти вещества для каждого типа осадков. Для этого необходимо отработать процесс флокуляции и изучить процесс адсорбции полиэлектролитов осадками сточных вод, реологические свойства взвесей сточных вод и растворов флокулянтов. Нужно также контролировать параметры фильтр-прессов для эффективного обезвоживания осадков сточных вод [13].

Список источников

1. Kamizela T., Kowalczyk M. Impact of conditioning substances and filtration pressure on dewatering efficiency of sewage // *Energies*. 2021. № 14. P. 361.
2. Maa Y., Liua Y. Turning food waste to energy and resources towards a great environmental and economic sustainability: An innovative integrated biological approach // *Biotechnol. Adv.* 2019. № 37. P. 107414.
3. Wójcik M., Stachowicz F. Influence of physical, chemical and dual sewage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency // *Powder Technol.* 2019. № 344. P. 96–102.
4. Wu B., Dai X., Chai X. Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge reutilizations // *Water Res.* 2020. № 180. P. 115912.
5. Bie'n B., Bie'n J. Dewatering of sewage sludge treated by the combination of ultrasonic field and chemical methods. *Desalin // Water Treat.* 2020. № 199. P. 72–78.
6. Chen C., Zhang P., Yan M. Enhancement of cationic polyacrylamide conditioning of sewage sludge with modified coal fly ash. *Desalin // Water Treat.* 2018. № 133. P. 55–63.
7. Conditioning of sewage sludge via combined ultrasonication-flocculation-skeleton building to improve sludge dewaterability / C. Zhu, P. Zhang, H. Wang, J. Ye // *Ultrason. Sonochem.* 2018. № 40. P. 353–360.
8. Bie'n B. The influence of conditioning on the quality of reject water after sewage sludge mechanical dewatering // *Proc. ECoPole*. 2017. № 11. P. 471–478.

9. Chen Y., Baygents J. C., Farrell J. Evaluating electrocoagulation and chemical coagulation for removing dissolved silica from high efficiency reverse osmosis (HERO) concentrate solutions // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. № 36. P. 50–55.
10. Preparation of octopus-like lignin-grafted cationic polyacrylamide flocculant and its application for water flocculation. / N. Chen, W. Liu, J. Huang, X. Qiu // *International Journal of Biological Macro-molecules*. 2020. № 146. P. 9–17.
11. Hasan A., Fatehi P. Cationic kraft lignin-acrylamide copolymer as a flocculant for clay suspensions: 2. Charge density effect // *Separation and Purification Technology*. 2019. №107. P. 963–972.
12. He W., Zhang Y., Fatehi P. Sulfomethylated kraft lignin as a flocculant for cationic dye. *Colloids and Surfaces // Physicochemical and Engineering Aspects*. 2016. № 503. P. 19–27.
13. Secondary effluent purification towards reclaimed water production through the hybrid post-coagulation and membrane distillation technology: A preliminary test / X. Liu, C. Tian, W. Sun, Y. Zhao, K. Shih // *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 271. P. 121797.

References

1. Kamizela T., Kowalczyk M. Impact of conditioning substances and filtration pressure on dewatering efficiency of sewage. *Energies*, 2021, no. 14, p. 361.
2. Maa Y., Liua Y. Turning food waste to energy and resources towards a great environmental and economic sustainability: An innovative integrated biological approach. *Biotechnol. Adv.*, 2019, no. 37, p. 107414.
3. Wójcik M., Stachowicz F. Influence of physical, chemical and dual se-wage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency. *Powder Technol.*, 2019, no. 344, pp. 96–102.
4. Wu B., Dai X., Chai X. Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations. *Water Res.*, 2020, no. 180, p. 115912.
5. Bie'n B., Bie'n J. Dewatering of sewage sludge treated by the combination of ultrasonic field and chemical methods. *Desalin. Water Treat.*, 2020, no. 199, pp. 72–78.
6. Chen C., Zhang P., Yan M. Enhancement of cationic polyacrylamide conditioning of sewage sludge with modified coal fly ash. *Desalin. Water Treat.*, 2018, no. 133, pp. 55–63.
7. Zhu C., Zhang P., Wang H., Ye J. Conditioning of sewage sludge via combined ultrasonication-flocculation-skeleton building to improve sludge dewaterability. *Ultrason. Sonochem.*, 2018, no. 40, pp. 353–360.
8. Bie'n B. The influence of conditioning on the quality of reject water after sewage sludge mechanical dewatering. *Proc. ECOpole.*, 2017, no. 11, pp. 471–478.
9. Chen Y., Baygents J. C., Farrell J. Evaluating electrocoagulation and chemical coagulation for removing dissolved silica from high efficiency reverse osmosis (HERO) concentrate solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, no. 36, pp. 50–55.

10. Chen, N., Liu, W., Huang, J., Qiu, X. Preparation of octopus-like lignin-grafted cationic polyacrylamide flocculant and its application for water flocculation. *International Journal of Biological Macro-molecules*, 2020, no. 146, pp. 9–17.
11. Hasan A., Fatehi P. Cationic kraft lignin-acrylamide copolymer as a flocculant for clay suspensions: 2. Charge density effect. *Separation and Purification Technology*, 2019, no. 107, pp. 963–972.
12. He W., Zhang Y., Fatehi P. Sulfomethylated kraft lignin as a flocculant for cationic dye. Colloids and Surfaces. *Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, no. 503, pp. 19–27.
13. Liu, X., Tian, C., Sun, W., Zhao, Y., Shih, K. Secondary effluent purification towards reclaimed water production through the hybrid post-coagulation and membrane distillation technology: A preliminary test. *Journal of Cleaner Production*, 2020, no. 271, pp. 121797.

Информация об авторах

Е. В. Ульрих – доктор технических наук, доцент, заместитель директора Института агроинженерии и пищевых систем, профессор кафедры производства и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции

А. С. Баркова – доктор ветеринарных наук, доцент, заведующая кафедрой производства и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции

Information about the authors

E. V. Ulrikh – Doctor of Engineering, Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Agroengineering and Food Systems, Professor of the Department of Production and Quality Assessment of Agricultural Products

A. S. Barkova – Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Production and Quality Assessment of Agricultural Products

Статья поступила в редакцию 26.06.2022; одобрена после рецензирования 07.07.2022; принята к публикации 15.07.2022

The article was submitted 26.06.2022; approved after reviewing 07.07.2022; accepted for publication 15.07.2022