









осветления. Под эффектом осветления подразумевают относительное количество выпавшей из суспензии взвеси.

Кривые кинетики осаждения хорошо описываются следующим уравнением общего вида:

$$\mathcal{E}_\tau = (\tau/120)^{a/\tau} \mathcal{E}_{120},$$

где  $\mathcal{E}_{120}$  и  $\mathcal{E}_\tau$  – эффекты осветления воды при продолжительности отстаивания соответственно  $\tau$  и 120 мин;  $a$  – коэффициент, зависящий от свойств взвесей, концентрации их в воде и высоты столба воды.

Коэффициент  $a$  устанавливается опытным путем и рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{\lg \tau_2 - \lg \tau_1}{\lg h_2 - \lg h_1}.$$

Величина  $\mathcal{E}_{120}$  может быть вычислена с использованием данных, определяемых при контроле качества осветленной воды, по формуле:

$$\mathcal{E}_{120} = \frac{C_0 - C_{120}}{C_0} \cdot 100, \%$$

где  $C_0$  – концентрация взвесей в исходной воде;  $C_{120}$  – концентрация взвесей в воде после отстаивания воды в течение 120 мин;  $C_0 - C_{120}$  – количество оседающих веществ.

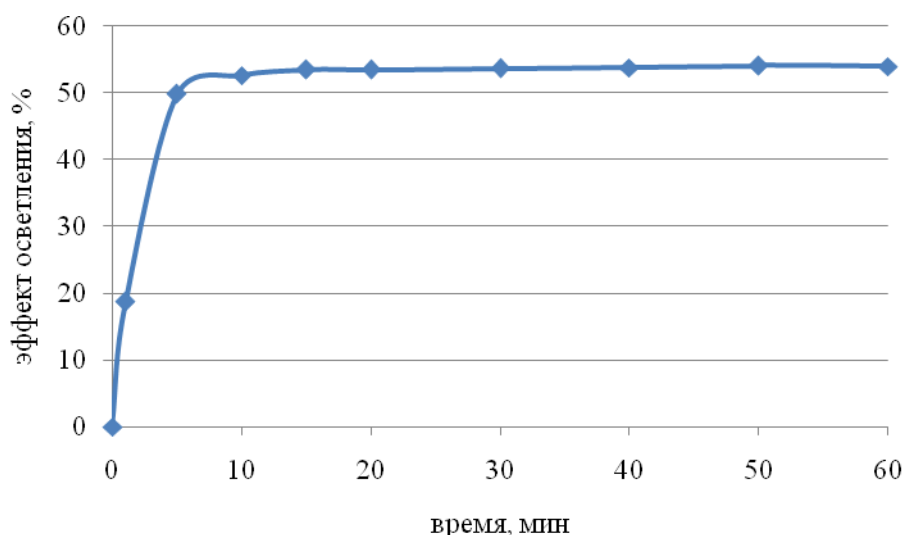
Таким образом, для построения кривой кинетики осаждения взвесей достаточно определить значение коэффициента  $a$ .

Изучение кинетики седиментации проводилось гравиметрическим методом при помощи цилиндров. Высота слоя суспензии в цилиндрах составляла  $H_c = 320$  мм [10].

Тщательно перемешанная магнитной мешалкой суспензия переливалась в мерный цилиндр, и далее замерялись время и высота слоя надильной воды, и рассчитывался эффект осветления. Замеры проводили каждые 5–10 минут в течение 1 ч для получения более четкой картины. Результаты представлены на рис. 1.

### ***Исследование осаждения избыточного ила в присутствии реагентов – коагулянтов и флокулянтов***

На следующем этапе работы исследовали эффект разделения избыточного активного ила (ИАИ) методом осаждения в присутствии коагулянтов и флокулянтов.

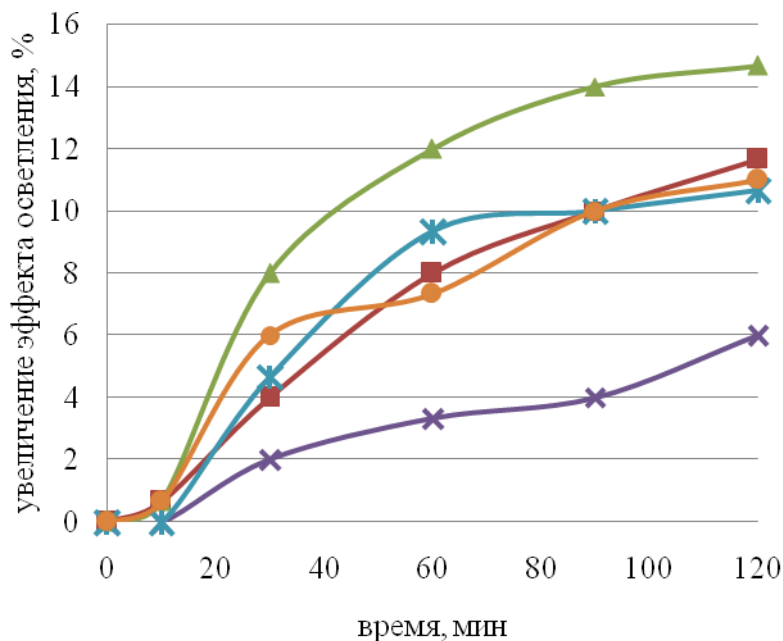


**Рис. 1.** Кривая осадения исходной пробы активного ила.

Реагентную обработку коагулянтами и флокулянтами минерального и органического происхождения применили для уменьшения влажности осадка. Для этого обычно применяют минеральные реагенты – соли железа ( $\text{Fe}^{3+}$ ), алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ), а также известь ( $\text{CaO}$ ), причем наиболее широко используется хлорное железо ( $\text{FeCl}_3$ ), применяемое в сочетании с известью. Кроме того, для обезвоживания осадков сточных вод широкое применение получили синтетические флокулянты – полиакриламид и сополимеры на его основе, которые образуют плотные агрегаты, обладающие высокой прочностью к усилию сдвига. Однако осадки биологической очистки сточных вод в основном содержат отрицательно заряженные частицы, поэтому для флокуляции таких осадков требуются флокулянты катионного типа. Катионные флокулянты образуют дополнительные химические связи между положительно заряженными катионами полимера и отрицательными анионами на поверхности частиц загрязнений. Помимо образования дополнительных связей, положительно заряженные катионы нейтрализуют отрицательный заряд взвешенных частиц, отталкивающий их друг от друга, что еще больше активизирует процесс их объединения с образованием флоккул. Широкую известность получили флокулянты катионного типа ВА-2, ВА-3, ВПК-101, ВПК-402 и др. Различные типы этих веществ подбираются индивидуально в зависимости от условий осадения и характеристик осадка.

В данной работе в качестве коагулянтов использовались сульфаты железа  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , а также хлорид магния  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . В качестве флокулянтов для обезвоживания ИАИ с очистных сооружений г. Зеленодольск было предложено проверить свойства альтернативных реагентов – крахмала, природного флокулянта – высшего полисахарида и престола (Praestol 611 BC (кат.)), который изготавливается в катионном, анионном и неионном виде. Данные флокулянты чаще применяются для очистки сточных вод и для интенсификации коагуляции при водоподготовке. Для полной реакции ИАИ с реагентами проводили непрерывное перемешивание проб в

течение 1 ч магнитной мешалкой с числом оборотов 1500 об/мин. Коагулянты использовали в виде водных растворов в диапазоне концентраций 1–10%, флокулянты – как 0,1–1% водные растворы. В эксперименте реагенты были взяты в концентрации 1%. Результаты экспериментов по определению эффективности разделения проб ИАИ приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Увеличение эффективности разделения проб ИАИ относительно исходной пробы в зависимости от времени при применении различных коагулянтов и флокулянтов: ■ – Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>; ▲ – FeSO<sub>4</sub>; × – MgCl<sub>2</sub>; ж – крахмал; ● – праестол.

Как видно из рисунка, при времени отстаивания 120 мин наибольший эффект осветления показал сульфат железа(II) – 14,5%. Сульфат алюминия, крахмал и праестол показали практически идентичные результаты в диапазоне 10,5–11,5%; хлорид магния увеличивал эффективность незначительно (6%) по сравнению с осаждением без добавления реагентов.

Низкие значения эффективности сульфата алюминия можно объяснить тем, что процессы обработки алюминийсодержащими коагулянтами производятся в узком интервале pH (pH = 6,2–6,5), в то время как известно, что значения pH ИАИ находится в диапазоне от 4 до 9.

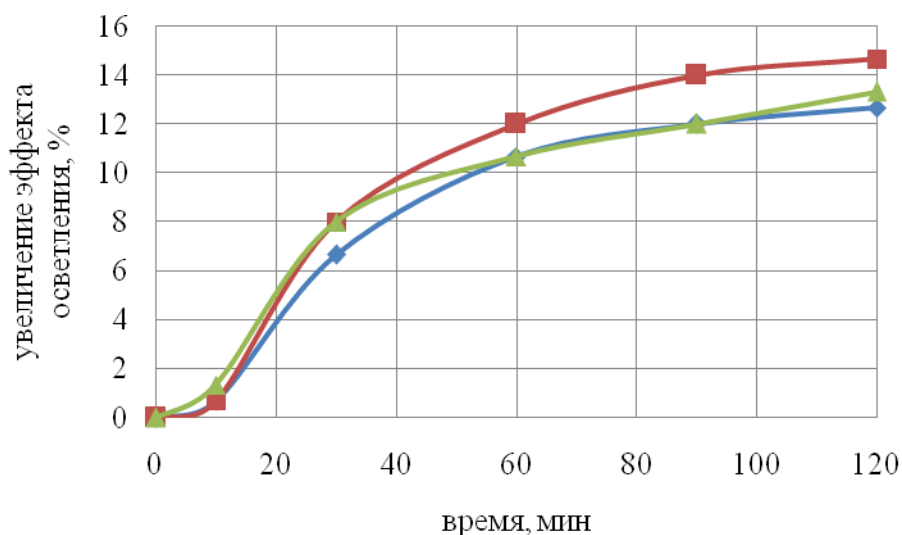
Хлорид магния обладает низкой коагулирующей способностью, по-видимому, в связи с низким зарядом иона магния (+2), кроме того, очистка солями магния производится при pH = 11, поэтому вместе с MgCl<sub>2</sub> необходим ввод дополнительных реагентов.

Крахмал в качестве флокулянта обладает слабой флокулирующей способностью в нейтральной среде, но эта способность существенно улучшается в сильнощелочных растворах (pH > 10). В зависимости от степени сбраживания или содержания органической субстанции лучшее хлопьеобразование дают марки Праестол с катионной активностью. Здесь

существует эмпирическое правило: чем сильнее степень сбраживания, тем ниже требуемая катионоактивность. При сыром осадке, активном иле или смешанном шламе наиболее подходящими являются флокулянты марки Праестол с высокой катионной активностью. Преобладающая часть активного ила требует повышенную степень катионоактивности. Этим, по-видимому, можно объяснить то, что выбор Praestol 611 BC (кат.) для обезвоживания данного типа осадков в нашем исследовании не дал удовлетворительных результатов.

Таким образом, для разрушения гидратной оболочки ИАИ в качестве коагулянта в дальнейших экспериментах применяли сульфат железа.

Дозы химических реагентов, необходимые для коагуляции осадков, зависят от удельного сопротивления фильтрации осадков: чем оно выше, тем больше реагентов требуется для его снижения. Доза сернокислого железа в каждом конкретном случае устанавливалась экспериментальным путем и варьировалась от 1 до 10 мл 1%-ного раствора  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  на 150 мл осадка. Эксперимент проводился аналогично с замером времени осаждения и толщины слоя осадка. Результаты представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Увеличение эффективности разделения влажного осадка относительно исходной пробы в зависимости от времени и дозы сульфата железа: ◆ – 1 мл; ■ – 5 мл; ▲ – 10 мл.

Эксперименты показали, что оптимальный показатель эффективности реагентной обработки избыточного активного ила, при котором разделение идет стабильно, соответствует эксперименту с применением соотношения 5 мл 1%-ного раствора  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  на 150 мл осадка. Дальнейшее увеличение дозы коагулянта на скорость обезвоживания не влияет, поэтому для 1%-ного раствора  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  оптимальной дозой целесообразно считать 5 мл на 150 мл осадка.

Кроме того, предполагается, что выбранный реагент может быть применен на аналогичных городских биологических очистных сооружениях для обработки избыточного активного ила с высокой концентрацией



органических загрязнений в фильтрате. Для сооружений с содержанием антропогенных токсикантов различной природы (нефтепродуктов, пестицидов, ПАВ, тяжелых металлов и т.д.) необходимо проводить аналогичные исследования с целью выбора оптимальных условий обезвоживания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены исследования эффективности реагентной обработки избыточного активного ила, содержащегося в осадках сточных вод с очистных сооружений. Изучена кинетика седиментации проб ила и построена кривая осаждения.

Проведены эксперименты по разделению твердых частиц осадка и воды в отсутствие и присутствии коагулянтов – сульфатов железа  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , хлорида магния  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и флокулянтов – крахмала и праестола (Praestol 611 BC (кат.)). Получено, что наилучшие результаты показал сульфат железа, а использование хлорида магния неэффективно.

Поскольку затраты на реагенты для коагуляции осадков составляют основную часть эксплуатационных затрат по обезвоживанию осадков сточных вод, доза коагулянта должна быть минимальной и в то же время обеспечивать достаточную производительность аппаратов разделения, что и было главным условием, которого придерживались в проведенных исследованиях.

Полученные данные для зольности активного ила показали, что разовое внесение реагентов не оказывает значительного влияния на увеличение количества минеральной части осадков. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что применение указанных реагентов является не только эффективным, но и универсальным методом для улучшения водоотдающих характеристик активного ила. На основе полученных данных по улучшению степени осаждения и уплотнения осадков сточных вод будут рассматриваться пути дальнейшей переработки, размещения и утилизации осадков сточных вод, образующихся на станциях очистки воды.

#### Список литературы:

1. Пинаев В.Е., Чернышев Д.А. // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 4. <https://naukovedenie.ru/PDF/04EVN414.pdf> (дата обращения 31.03.2019).
2. Ксенофонтов Б.С. // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 9. С. 4. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-9-4-7.
3. Моран Э., Плеханов А.В., Лобанов Ф.И. // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 6. С. 47.
4. Сибиева Л.М., Ежкова Д.В., Сироткин А.С., Вдовина Т.В. // Вода: химия и экология. 2017. № 7 (109). С. 31.
5. Гапоненков И.А., Федорова О.А. // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16. № 4. С. 681.
6. Сизых М.Р. // Вестник Бурятского государственного университета. 2013. № 3. С. 17.
7. Вербовский О.В. Дис. ... канд. техн. наук. Ровно: Укр. гос. акад. водного хозяйства, 1996.
8. Стрекалова Д.О., Савелова Е.А. // Аллея науки. 2018. Т. 2. № 3 (19). С. 385.
9. ФР 1.31.2008.04397 «Методика выполнения измерений массовой концентрации активного ила». М.: Акварос, 2008.

10. Дремичева Е.С., Гаврилов А.С. // Химическая безопасность. 2018. Том 2. № 2. С. 286. DOI: 10.25514/CHS.2018.2.14122.

References:

1. Pinaev V.E., Chernyshev D.A. // Online magazine «Naukovedenie» [Science]. 2014. No. 4. <https://naukovedenie.ru/PDF/04EVN414.pdf> (accessed 31.03.2019) [in Russian].
2. Ksenofontov B.S. // *Ecologiya i promishlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia]. 2018. V. 22. No. 9. P. 4 [in Russian]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-9-4-7.
3. Moran E., Plekhanov A.V., Lobanov F.I. // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Watersupply and sanitary equipment]. 2017. No. 6. P. 47 [in Russian].
4. Sibieva L.M., Ezhkova D.V., Sirotkin A.S., Vdovina T.V. // *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology]. 2017. No. 7 (109). P. 31 [in Russian].
5. Gaponenkov I.A., Fedorova O.A. // *Vestnik MGTU* [Bulletin of MSTU]. 2013. V. 16. No. 4. P. 681 [in Russian].
6. Szykh M.R. // *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Buryat State University]. 2013. No. 3. C. 17 [in Russian].
7. Verbovskiy O.V. PhD Thesis (Engineering). Rovno: Ukr. State Acad. Water Management, 1996 [in Ukrainian].
8. Strekalova D.O., Savelova E.A. // *Alleya Nauki* [Alley of Science]. 2018. V. 2. No. 3 (19). P. 385 [in Russian].
9. FR 1.31.2008.04397. Methods for measuring mass concentration of active sludge. Moscow: Akvaros, 2008 [in Russian].
10. Dremicheva E.S., Gavrilov A.S. // *Him. bezop.* 2018. V. 2. No. 2. P. 286 [in Russian]. DOI: 10.25514/CHS.2018.2.14122.