



Использование извести для удаления фосфатов из сточных вод

В сточной воде всегда присутствуют фосфаты, как результат жизнедеятельности человека и применения им в быту моющих средств. В ходе биологической очистки сточной воды (независимо от применяемого варианта технологической схемы) фосфор потребляется на построение клеточного вещества и энергетические преобразования в клетках микроорганизмов. Потребность в фосфоре составляет порядка 5 % от потребности в органическом веществе. Поступление же фосфора в сточные воды намного превосходит потребности биологических процессов, неиспользованный фосфор остаётся в очищаемой сточной воде в той или иной форме. Сброс сточных вод, богатых фосфором, в водные объекты приводит к постепенному накоплению фосфора в воде водоёма и, как следствие, к эвтрофикации водных объектов. Наиболее стремительно эффект зарастания водоёмов проявляется в малопроточных и маломощных водных объектах.

В связи с этим законодательно введено требование нормирования фосфатов, сбрасываемых в водоприёмники. Современные требования предполагают глубокое удаление фосфатов на 93–98 %. Оста-

точные концентрации фосфатов в очищаемой сточной воде должны быть рассчитаны из условия достижения в расчётном створе установленной предельно допустимой концентрации (ПДК): для олиготрофного водного объекта — 0,05 мг Р/л, мезотрофного — 0,15 и гипертрофного — 0,2 мг Р/л. Учитывая, что концентрации в биологически очищенных сточных водах высокие, потребность в глубоком удалении фосфатов из сточных вод — практически постоянная.

Глубокое удаление фосфатов из сточных вод наиболее просто осуществить путём перевода их в нерастворимые соединения с использованием традиционных реагентов выводом из системы с осадками [1–4]. Технологии представляют наибольший интерес своей доступностью для реализации на существующих очистных сооружениях с минимальным использованием дополнительного оборудования. В основном в качестве реагентов могут быть применены традиционные реагенты, используемые в практике водоподготовки, и известь. Наибольшее распространение в качестве реагентов получило использование солей трёхвалентных металлов — алюминия и железа.

Рецензия эксперта на статью получена
27.11.2024 [The expert review of the article
was received on November 27, 2024]

УДК 628.3. Научная специальность: 2.1.4.

Использование извести для удаления фосфатов из сточных вод

Н. А. Залётова, д.т.н., профессор; **С. В. Залётов**, к.т.н., доцент, кафедра водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Известь является наиболее дешёвым реагентом, который может быть использован для удаления фосфатов из сточных вод. Однако применение извести для обработки сточных вод, поступающих на очистные сооружения, либо очищенных сточных вод нерационально из-за усложнения технологической схемы, связанного с необходимостью дополнять схему технологией рекарбонизации общего потока сточных вод, поступающих на очистные сооружения. В работе показано, что применение извести для очистки внутриплощадочных потоков сточных вод может стать весьма успешным вариантом обработки высококонцентрированных сточных вод, в том числе богатых фосфором. Показано, что при определенных соотношениях очищаемого потока сточных вод и внутриплощадочных потоков может быть принята схема без рекарбонизации. Применение извести для обработки сточных вод может оказаться экономически привлекательным.

Ключевые слова: сточные воды, очистные сооружения, реагенты, биологическая очистка воды, химическая очистка воды, фосфор, известь.

UDC 628.3. The number of scientific specialty: 2.1.4.

The use of lime to remove phosphates from wastewater

N. A. Zaletova, Doctor of Technical Sciences, Professor; **S. V. Zaletov**, PhD, Associate Professor, the Department of Water Supply and Sanitation, National Research Moscow University of Civil Engineering (NRU MGSU)

Lime is the cheapest reagent that can be used to remove phosphates from wastewater. However, the use of lime for the treatment of wastewater entering wastewater treatment plants (or treated wastewater) is not rational due to the complexity of the technological scheme associated with the need to supplement the scheme with recarbonization technology for the total flow of wastewater entering wastewater treatment plants. The performed studies have shown that the use of lime for on-site wastewater treatment can be a very successful option for on-site treatment of highly concentrated wastewater, including phosphorus-rich wastewater. It is shown that at certain ratios of the treated wastewater flow and on-site flows, a scheme without recarbonization can be adopted. The use of lime for the treatment of wastewater may be economically attractive.

Key words: wastewater, sewage treatment plants, reagents, biological water treatment, chemical water treatment, phosphorus, lime.



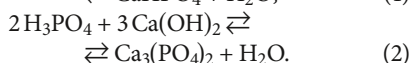
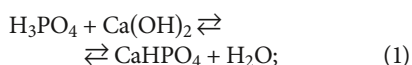
:: Пример эвтрофикации водоёма — насыщения биогенными элементами, сопровождаемого ростом биологической продуктивности, то есть «зарастания» водного бассейна

Теоретически количество необходимого реагента для удаления фосфора обусловлено стехиометрическим соотношением фосфора и ионов реагента в реакции, а именно — для удаления одного фосфата требуется один ион металла. Однако из-за наличия в сточной воде большого количества других загрязняющих веществ, с которыми реагент тоже может вступать в реакцию, реальная потребность в реагентах намного превышает стехиометрическое соотношение.

Технологии реагентного удаления фосфора с применением солей трёхвалентных металлов изучены относительно подробно и в лабораторных, и в опытно-промышленных условиях [5]. В данной работе показано, что реагенты могут вводиться в любую точку технологической цепи биологической очистки.

Влияние реагента на технологические параметры процессов может быть учтено введением определённых коэффициентов для того или иного процесса. Например, при реагентном фильтровании корректируется скорость фильтрования, высота и крупность загрузочного материала фильтра, при симультанном осаждении вводятся коэффициенты снижения удельной скорости окисления органических веществ и др.

Технология применения извести для целей удаления фосфора из сточных вод изучена менее подробно. Химическая реакция взаимодействия фосфатов и извести идёт с образованием ди- и трифосфата кальция по следующим формулам:



Известно, что при применении извести в качестве реагента для удаления фосфатов эффект их изъятия связан не только

с исходной концентрацией фосфатов, но и с показателем pH, достигаемым в ходе реакции. Глубокое удаление фосфатов имеет место при показателе более 10. Однако сброс сточных вод в водные объекты с таким показателем pH не допустим, поскольку ограничен величиной $\text{pH} = 6,5\text{--}8,5$ [6, 7]. Известь на ступени биологической очистки (при подаче сточной воды в аэротенк), либо на ступени третичной очистки (перед сбросом в водный объект) может быть применена только в случае включения в технологическую схему очистки сточных вод процесса рекарбонизации. Дополнительная технология

Сброс сточных вод, богатых фосфором, в водные объекты приводит к постепенному накоплению фосфора в воде водоёма и, как следствие, к эвтрофированию водных объектов, то есть его быстрому «зарастанию»

усложняет технологическую схему очистки, усложняет эксплуатацию очистных сооружений и приводит к росту стоимости очистки. В силу этого применение извести для очистки основного потока сточных вод распространение не получило.

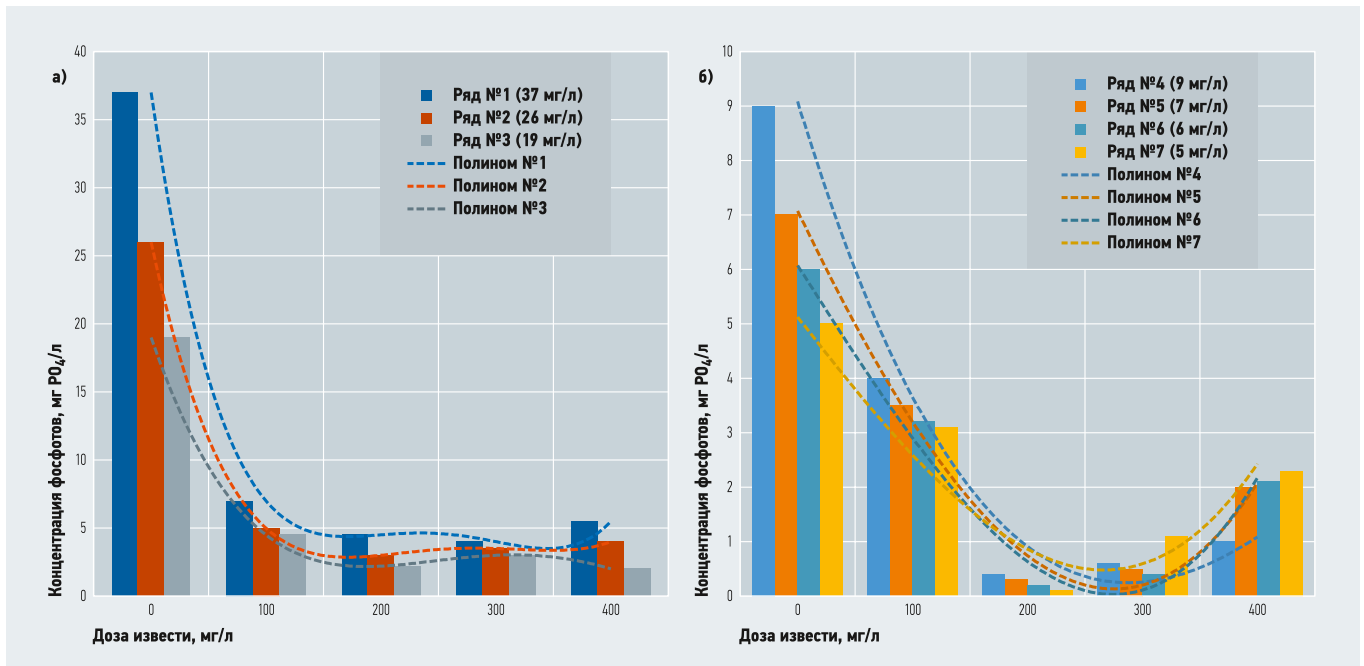
На площадке очистных сооружений формируются внутриплощадочные потоки сточных вод: внутриплощадочная канализация, дренажные воды с песчаных и иловых площадок, жидкая фаза осадков, отделяемая при сбраживании и обезвоживании и др. Все формирующиеся потоки подлежат очистке, а потому возвращаются на вход сооружений для очистки. Некоторые из них имеют высокие концентрации фосфатов, например, жидкая фаза осадков, сброженных в метантенках, фугаты и фильтраты при ме-

ханической обработке осадков, фосфаты после высвобождения их в анаэробных условиях в некоторых других технологических процессах глубокого удаления фосфора биологическим методом [8, 9]. Эти потоки, несмотря на их относительно небольшое количество по сравнению с основным потоком очищаемых сточных вод, могут содержать настолько высокие концентрации фосфатов (до 80–210 мг/л), что поступление их в голову сооружений приведёт к росту концентрации фосфатов в общем стоке. Следовательно, требуется повышение потребности в реагенте для обработки фактического формирующегося основного потока очищаемых сточных вод, что приведёт к удорожанию очистки сточных вод. Поэтому возникает задача локально удалять фосфаты.

Перед настоящими исследованиями стояла задача выявить технологическую целесообразность и условия приёма (подачи) сточных вод внутриплощадочной канализации в общий поток сточных вод, поступающих на канализационные очистные сооружения. Рассмотрена предварительная обработка внутриплощадочного стока известью.

Особенности исполнения технологии обработки известью сточных вод с повышенным содержанием фосфатов изучались нами в контактных условиях при проведении пробной коагуляции. Опыты выполнены в цилиндрах ёмкостью 1 л. В цилиндры заливалась сточная вода с различным содержанием фосфатов. Сюда же добавляли раствор известкового молока в предварительно рассчитанных количествах для создания возрастающей концентрации извести и, соответственно, показателя pH, перемешивали, отстаивали, анализировали. Определяли концентрацию фосфатов, pH, щёлочность, оптическую плотность.

На анализ образцы иловых проб отбирались на опытно-технологической установке, работающей на натуральной городской сточной воде и функционирующей в режиме биологической очистки с обработкой рециркулирующего ила в анаэробных условиях [10]. Изменения режимов работы установки позволяли получить образцы проб с широким диапазоном концентраций фосфатов от 5 до 70 мг P/л. В качестве реагента было использовано известковое молоко с активностью 20% по СаО. Рассмотрена эффективность применения извести при дозах реагента в диапазоне 100–400 мг/л. Выявлялось влияние введения извести на показатели pH и щёлочность. Проведена оценка характера воздействия извести на динамику отстаивания и осветление обрабатываемого потока.



:: Рис. 1. Влияние дозы извести на изъятие фосфатов в сточной воде, содержащей различные концентрации (а — высокое содержание фосфатов в исходном потоке, б — малое содержание фосфатов в исходном потоке)

Результаты эксперимента и обсуждение

Результаты пробного коагулирования известью представлены диаграммами с различными диапазонами исходных концентраций фосфатов — 20–40 мг/л (А) и 5–10 мг/л (Б), которые приведены на рис. 1, а также табл. 1. В табл. 1 представлены данные об эффективности удаления фосфатов при обработке известью сточной воды, содержащей различные концентрации фосфатов. Из приведённых данных следует, что характер влияния извести на снижение фосфатов при различных исходных концентрациях фосфатов в общем схож для условий (А) и (Б), хотя в деталях имеются различия.

При высоких концентрациях фосфатов в очищаемой воде (А) введение дозы

извести 100 мг/л привело к снижению концентрации фосфатов на 78–81 %. Увеличение дозы извести до 200 мг/л вызвало дальнейшее, но не столь значительное снижение концентрации фосфатов. Обработка стока известью дозой 400 мг/л привела не к снижению, но даже к некоторому небольшому повышению остаточных концентраций фосфатов. Обращает вни-

мание тот факт, что для данного диапазона исходных концентраций фосфатов для весьма широкого интервала доз извести не был достигнут показатель ПДК по фосфатам.

При относительно низких загрязнениях фосфатами очищаемой воды (Б) введение дозы извести 100 мг/л вызвало снижение концентрации фосфатов на

:: Эффективность удаления фосфатов известью

табл. 1

Доза извести, мг СаО/л	37	26	19	9	7	6	5
Исходная концентрация фосфатов, мг Р/л	Эффективность удаления фосфатов известью [%] при исходной концентрации фосфатов в сточной воде						
	(А)			(Б)			
100	78,1	80,7	76,3	55,0	50,0	46,7	38,0
200	92,0	90,4	89,4	95,0	95,7	96,7	98,0
400	85,1	84,6	89,4	88,9	67,1	65,0	60,0



76–80 %. При повышении дозы извести до 200 мг/л концентрация фосфатов снизилась на 97–98 %, и имело место удаление фосфатов вплоть до установленных ПДК, что могло бы уменьшить содержание фосфатов в общем стоке. Опыты с более высокими дозами извести (от 200 до 400 мг/л) продемонстрировали обратное явление — имел место рост остаточных концентраций фосфатов по сравнению с предыдущим наилучшим достигнутым результатом очистки от фосфатов. Повышение концентрации фосфатов в очищаемых водах в данном случае, возможно, связано с токсичным влиянием показателя рН, приводящего к разложению клеточного вещества активного ила вод и высвобождению фосфатов из органических веществ в воду.

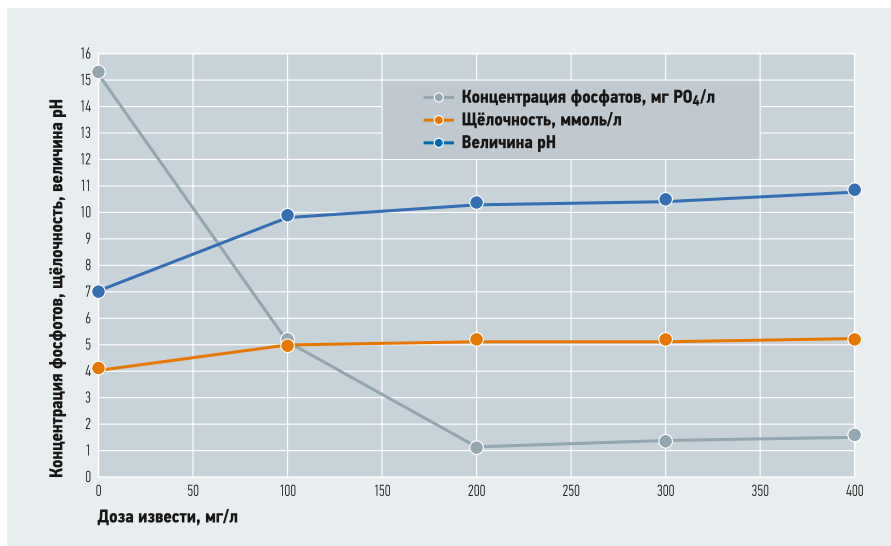


Рис. 2. Влияние дозы извести на отдельные показатели обрабатываемой сточной воды

Влияние дозы вводимой извести на показатель pH и величину щёлочности представлено на рис. 2. На примере сточной воды, содержащей 15 мг P/л, показано, что наиболее высокое удаление фосфатов имело место при обработке сточной воды с концентрацией извести 100 мг/л. При этом показатель pH вырос с 7 до 10. Введение извести сопровождалось некоторым повышением щёлочности обрабатываемой сточной воды. Концентрация фосфатов снизилась с 15 до 5 мг/л.

Наилучший эффект осветления достигнут в течение 120 минут. Обработанные известью стоки хорошо осветляются независимо от дозы введённой извести. Для реакции взаимодействия достаточно пяти минут. При более высоких исходных концентрациях фосфатов, возможно, потребуется увеличение времени перемешивания до 15 минут

Увеличение дозы извести вдвое, то есть до 200 мг/л, позволило поднять эффективность удаления фосфатов и обеспечить снижение концентрации фосфатов до 1,1 мг/л при некотором повышении pH и незначительном увеличении щёлочности.

Полученные данные свидетельствуют о том, что введение извести приводит к резкому увеличению показателя pH и небольшому росту щёлочности воды.

Воздействие обработки известью на осветление сточной воды оценено косвенно по изменению показателя оптической плотности отстоянной жидкости при создании различных условий осаждения при различных дозах извести в образцах проб.

При начальном вводе извести во всём диапазоне изученных доз оптическая плотность обрабатываемой воды резко увеличивается (в течение первых пяти минут отстаивания после введения) и становится тем выше, чем выше доза извести, что видно из данных, приведённых на рис. 3. При дальнейшем отстаивании происходит быстрое снижение оптической плотности, то есть осветление.

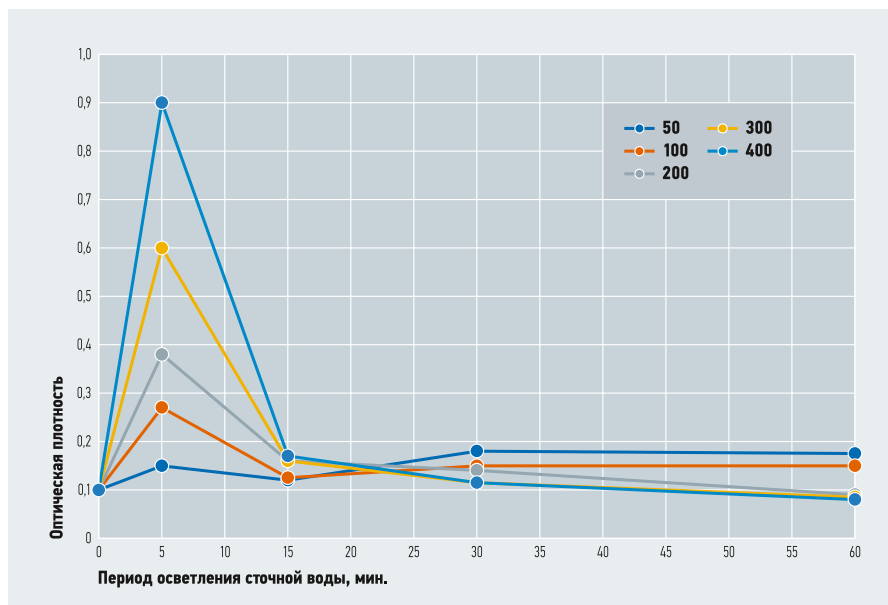


Рис. 3. Зависимость величины оптической плотности сточной воды от времени её осветления

Основная масса взвешенных веществ оседала практически в течение 15 минут. Увеличение времени отстаивания приводит к проявлению зависимости остаточной степени осветления от дозы извести: чем выше доза извести, тем лучше осветляется сточная вода.

Проверено влияние крепости известкового раствора на эффективность осветления сливной воды. В каждый цилиндр, заполненный сливной водой, добавлен раствор известкового молока, обеспечивающий рост концентрации извести 5, 10 и 20%. Цилиндры поставлены для отстаивания. Через 30 минут определено снижение оптической плотности (то есть осветления) на 50% от исходной оптической плотности обрабатываемой воды. Наилучший эффект осветления достигнут в течение 120 минут. Обработанные известью стоки хорошо осветляются независимо от дозы введённой извести. Для реакции взаимодействия достаточно пяти минут. При более высоких исходных концентрациях фосфатов, возможно, потребуется увеличение времени перемешивания до 15 минут для прохождения более глубокой реакции и получения более низких остаточных концентраций фосфатов.

Согласно технологической схеме очистки сточных вод, после предварительной обработки внутриплощадочных потоков они возвращаются в голову очистных сооружений для обеспечения нормативной очистки общего потока, то есть внутриплощадочный поток должен смешиваться со сточной водой, поступающей на очистные сооружения, и очищаться до показателей, позволяющих сбрасывать сточные воды в водные объекты.

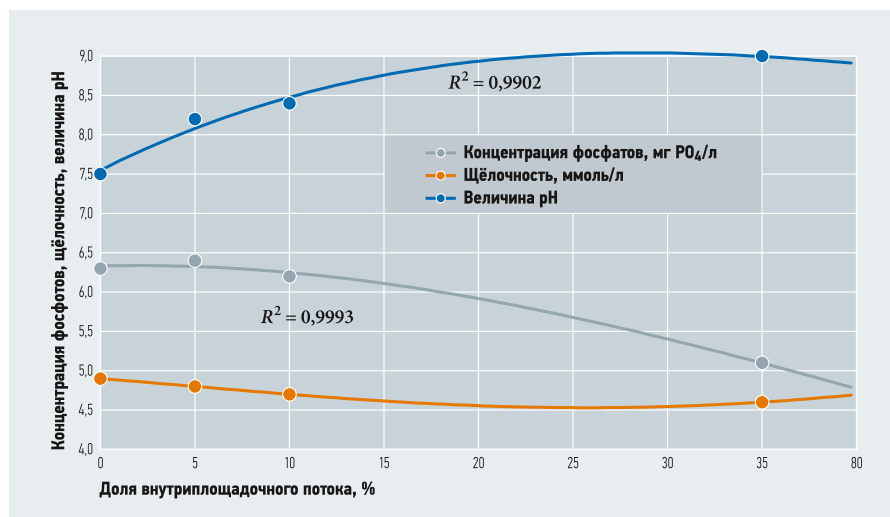


Рис. 4. Изменение показателей pH, щёлочности и фосфатов в зависимости от доли внутриплощадочной воды, возвращаемой на очистку (1 — фосфаты; 2 — pH; 3 — щёлочность)

Для оценки изменения показателя pH в контактных условиях в моделях определялись показатели pH смеси очищаемых сточных и щелочных сливных вод, составленных в различных пропорциях. Экспериментально определен допустимый процент высокощелочной воды в смеси поступающей на очистку сточной воды (с характерным содержанием фосфатов 5 мг/л) и обработанного известью возвратного потока (при снижении содержания фосфатов до 2 мг/л при повышении pH до 11) внутриплощадочной канализации. На рис. 4 приведены данные, характеризующие изменение pH и щёлочности при различных соотношениях обрабатываемой сточной воды и внутриплощадочной воды после обработки последней известью при указанных выше условиях.

Кривая 2, характеризующая изменение pH, свидетельствует о том, что введение сливной воды с показателем pH = 11 может оказать заметное влияние на pH смеси даже при относительно небольшой доле возвратного потока — порядка 10–15 %. Определено, что при увеличении доли сливной воды, возможно, помимо снижения концентрации фосфатов (кривая 3), происходит снижение содержания в ней органических веществ до 30 %.

Определение расчётной дозы извести зависит от ряда параметров, а потому при выявлении оптимального решения технологической схемы очистки сточных вод следует рассматривать варианты, позволяющие рационально использовать известь и сократить использование дорогостоящего реагента.

Зная основные расходы потоков сточных вод на объекте, и концентрации фосфатов в потоках, можно рассчитать оптимальный, экономически и технологически наиболее благоприятный режим подачи реагентов для всей технологической схемы очистки сточных вод

Заключение

Известь — наиболее дешёвый реагент, позволяющий удалять соединения фосфора из сточных вод химическим путём.

1. При низких концентрациях фосфатов в сточной воде допустима обработка известью всего потока сточных вод. Однако при высокой концентрации фосфатов в исходной воде, обработка известью

всего потока сточных вод невозможна без введения дополнительной ступени очистки — рекарбонизации.

2. Для внутриплощадочных потоков сточных вод максимально допустимая доза извести 200 мг/л. Повышение дозы извести более 200 мг/л, независимо от величины исходной концентрации фосфатов в обрабатываемой воде, ведёт к разложению органических веществ сточной воды.

3. Добавление к осадку первичных отстойников и избыточному активному илу осадка, содержащего известь, может рассматриваться в качестве минеральной присадки, что позволяет сократить расход потребных реагентов при механическом обезвоживании осадков.

4. Применение извести в качестве реагента создаёт наименьшую угрозу формированию вторичного загрязнения очищаемых сточных вод, поскольку известь отнесена к четвёртому классу опасности (малоопасное вещество) по ГОСТ 12.1.007–76.

5. Зная основные расходы потоков сточных вод на объекте, и концентрации фосфатов в потоках, можно рассчитать оптимальный, экономически и технологически наиболее благоприятный режим подачи реагентов для всей технологической схемы очистки сточных вод и рассчитать рациональный (экономичный) режим использования реагентов.

1. Амбросова Г.Т., Гвоздев В.А., Цветкова О.П., Ксенофонтова О.В. Возможные варианты интенсификации очистных сооружений канализации // Известия вузов. Строительство, 2005. №4. С. 100–106.
2. Баженов В.И., Денисов А.А. Разработка типовых проектов современных сооружений биологической очистки сточных вод // Водоотведение, 2010. №4. С. 28–31.
3. Вильсон Е.В., Романенко Е.Ю. Методологические аспекты физико-химического удаления фосфора из сточных вод на различных этапах очистки // Символ науки, 2015. №11. С. 16–20.
4. Гандурина Л.В., Буцева Л.Н., Штондина В.С. Реагентный способ удаления соединений фосфора из сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника, 2001. №6. С. 18–20.
5. Залётова Н.А. Очистка городских сточных вод от биогенных веществ (соединений азота и фосфора): дисс. доктора техн. наук по спец. 05.23.04. — М.: НИИ КВОВ, 1999. 399 с.
6. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение / Утв. приказом Госкомрыболовства России от 28.04.1999 №96.
7. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов / Дата введ.: 01.09.2020.
8. Матюшенко Е. Н. Реагентное удаление фосфора из стоков внутриплощадочной канализации: дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.04. — СПб.: СПбГАСУ, 2021. 161 с.
9. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения [СНиП 2.04.03–85] (с Изм. №1–3) / Дата введ.: 26.06.2019.
10. Залётова Н.А., Залётов С.В., Виноградов А.Ю. Глубокое удаление фосфора в технологиях очистки сточных вод // Журнал СОК, 2023. №5. С. 36–39.

References — see page 80.



The use of lime to remove phosphates from wastewater. Pp. 25–29.

Nina A. Zaletova, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Sergey V. Zaletov**, PhD, Associate Professor, Department of Water Supply and Sanitation, National Research Moscow University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. G.T. Ambrosova, V.A. Gvozdev, O.P. Tsvetkova, O.V. Ksenofontova. *Vozmozhnye varianty intensifikatsii ochnitsnykh sooruzhenij kanalizatsii* [Possible options for intensifying sewerage treatment facilities]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of Universities. Series: Construction]. 2005. No. 4. Pp. 100–106. [In Russian].
2. V.I. Bazhenov, A.A. Denisov. *Razrabotka tipovykh proektov sovremennykh sooruzhenij biologicheskoy ochnitski stochnykh vod* [Development of standard projects for modern biological wastewater treatment facilities]. *Vodootvedenie* ["Water disposal" Magazine]. 2010. No. 4. Pp. 28–31. [In Russian].
3. E.V. Wilson, E.Ju. Romanenko. *Metodologicheskie aspekty fiziko-himicheskogo udaleniya fosfora iz stochnykh vod na razlichnykh etapakh ochnitski* [Methodological aspects of physico-chemical removal of phosphorus from wastewater at various stages of treatment]. *Simvol nauki* ["The symbol of science" Magazine]. 2015. No. 11. Pp. 16–20. [In Russian].
4. L.V. Gandurina, L.N. Butseva, V.S. Shtondina. *Reagentnyy sposob udaleniya soedinenij fosfora iz stochnykh vod* [Reagent method for removing phosphorus compounds from wastewater]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water supply and sanitary engineering" Magazine]. 2001. No. 6. Pp. 18–20. [In Russian].
5. N.A. Zaletova. *Ochnitka gorodskikh stochnykh vod ot biogenykh veshchestv (soedinenij azota i fosfora)* [Treatment of municipal wastewater from biogenic substances (nitrogen and phosphorus compounds)]. Doctor of Technical Sciences thesis in scientific specialty No. 05.23.04. Moscow. *NIi KVOV* [Research Institute for Municipal Water Supply and Water Treatment (RIKVOV)]. 1999. 399 p. [In Russian].
6. *Perechen' rybokhozjajstvennykh normativov: predel'no dopustimyykh kontsentratsij (PDK) i orientirovanno bezopasnykh urovnej vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlja vody vodnykh ob'ektov, imeyushchikh rybokhozjajstvennoe znachenie* [List of fishery standards: Maximum permissible concentrations (MPC) and approximate safe impact levels (OSIL) of harmful substances for water bodies of fishery importance]. *Utv. prikazom Goskomrybolovstva Rossii ot 28.04.1999 №96* [Approved by the order of the State Fisheries Committee of Russia No. 96 of April 28, 1999]. [In Russian].
7. *ITS 10-2019* [Information and technical reference book on the best available technologies No. 10-2019]. *Ochnitka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenij, gorodskikh okrugov (s popr.)* [Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts (with Amendment)]. Date of impl.: September 1, 2020. [In Russian].
8. E.N. Matyushenko. *Reagentnoe udalenie fosfora iz stokov vnutriplushchadochnoj kanalizatsii* [Reagent removal of phosphorus from on-site sewerage]. PhD dissertation in scientific specialty No. 05.23.04. St. Petersburg. *SPbGASU* [St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering]. 2021. 161 p. [In Russian].
9. *SP 32.13330.2018* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 32.13330.2018]. *Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya* [SNiP 2.04.03–85] (s *Izm. No. 1–3*) [Sewerage. External networks and structures [The Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations of Russia (Russian Public Health Regulations) No. 2.04.03–85 (with Amendments No. 1–3)]. Date of impl.: June 26, 2019. [In Russian].
10. N.A. Zaletova, S.V. Zaletov, A.Ju. Vinogradov. *Glubokoe udalenie fosfora v tekhnologiyakh ochnitski stochnykh vod* [Deep removal of phosphorus in wastewater treatment technologies]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 5. Pp. 36–39. [In Russian].