

УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА ИЗ ВОЗВРАТНЫХ ПОТОКОВ ПЛОЩАДКИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНАЛИЗАЦИИ

Матюшенко Е. Н.

PHOSPHORUS REMOVAL FROM RETURN FLOWS OF A WASTEWATER TREATMENT PLANT

Matyushenko E. N.

Аннотация

Введение: в статье изложена проблема, связанная с негативными последствиями, возникающими при сбросе в водоем с очищенными стоками остаточных концентраций фосфора. Дается краткая оценка известных методов удаления фосфора. Целью настоящей работы было выявление мест обогащения сточных вод фосфором на Новосибирских очистных сооружениях канализации (ОСК) и предложение простого способа его снижения с получением азотфосфорсодержащего осадка, пригодного для повторного применения. **Методы:** исследования проводились на натуральных сточных водах с определением основных физико-химических показателей качества сточных вод с использованием современного лабораторного оборудования. **Результат:** поступающая на ОСК сточная жидкость имеет несколько источников насыщения фосфором: стоки от жилой застройки и промышленных предприятий, иловая вода уплотнителей избыточного активного ила или иловая вода уплотнителей совместного сгущения сырого осадка и избыточного активного ила, иловая вода уплотнителей промытого осадка в схемах с метантенками и вакуум-фильтрами, а также иловая вода иловых площадок, фугат центрифуг и фильтрат фильтр-прессов. Установлено, что сброс этих стоков в голову очистных сооружений канализации на повторную очистку приводит к увеличению концентрации взвешенных, органических и биогенных веществ (азот и фосфор) в исходной сточной жидкости в зависимости от состава сооружений и времени года. В результате увеличивается и концентрация данных показателей в очищенной сточной жидкости, сбрасываемой в водный объект. Настоящие исследования были посвящены удалению фосфора путем ввода только гидроксида натрия. Исследования проводились в химической лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения НГАСУ (Сибстрин). В работе использовались фугат и иловая вода илоуплотнителей. Получены сведения о количестве биогенных элементов в возвратных потоках узлов обработки осадков и цеха механического обезвоживания осадка. Приводятся результаты исследований по удалению фосфора из сточных вод внутриплощадочной канализации за счет ионов кальция и магния, присутствующих в сточной жидкости в щелочной среде. Установлено, что при концентрации фосфора менее 30 мг/дм³ в исходном потоке возможно снизить фосфор при pH 11 до 1 мг/дм³, а при более высоких показателях — концентрация фосфора достигает 10–20 мг/дм³ при тех же значениях pH. **Заключение:** разработана простая в эксплуатации технологическая схема удаления фосфора из стоков внутриплощадочной канализации, позволяющая снижать

Abstract

Introduction: The paper reviews an issue associated with negative consequences resulting from discharge of treated wastewater with residual phosphorus concentrations. The known methods of phosphorus removal are briefly assessed. The purpose of the study was to identify places of wastewater phosphorization at Novosibirsk wastewater treatment plants (WWTPs) and suggest a simple method for its reduction to obtain nitrogen and phosphorus-containing sludge suitable for reuse. **Methods:** The studies were carried out using natural wastewater. Basic physical and chemical wastewater quality indicators were defined with the help of modern laboratory equipment. **Results:** The waste liquid entering the WWTPs has several sources of phosphorus saturation: wastewater from residential buildings and industrial enterprises, sludge water from thickeners of excess activated sludge, sludge water from thickeners for joint thickening of raw sludge and excess activated sludge, sludge water from thickeners of washed sludge used with methane tanks and vacuum filters, as well as sludge water of sludge beds, centrifuge centrate and filtrate of filter presses. It has been found that discharge of such wastewater into the WWTP inlet chamber for retreatment leads to an increase in the concentrations of suspended substances, organic substances, and nutrients (nitrogen and phosphorus) in the primary wastewater, depending on the facilities structure and season. As a result, their concentrations in treated wastewater, discharged into a water reservoir, increase as well. Our studies involved phosphorus removal using sodium hydroxide only. They were conducted in a chemical laboratory at the Department of Water Supply and Disposal of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). The centrate and sludge water from thickeners were analyzed. Data on the volume of nutrients in return flows of the sludge processing units and workshop of mechanical sludge dewatering were received. The paper shows results of studies on phosphorus removal from the wastewater of the on-site sewage by means of calcium and magnesium ions present in the waste liquid in an alkaline medium. It has been founded that at phosphorus concentrations less than 30 mg/dm³ in the primary stream, it is possible to reduce phosphorus at pH = 11 to 1 mg/dm³, and at higher values, the phosphorus concentration can reach 10–20 mg/dm³ at the same pH values. **Conclusion:** An easy-to-use process scheme for phosphorus removal from the wastewater of the on-site sewage has been developed. It allows reducing phosphorus in treated wastewater, discharged into a water reservoir, to 0.5–0.7 mg/dm³ at phosphorus concentrations up to 30 mg/dm³ using only sodium hydroxide. At high phosphorus concentrations, it is possible

фосфор в очищенной сточной жидкости, сбрасываемой в водоем, до 0,5–0,7 мг/дм³ при концентрациях фосфора до 30 мг/дм³ путем ввода только гидроксида натрия, а при больших концентрациях фосфора возможен ввод извести в соотношении P:Ca²⁺ = (1–1,5) и гидроксида натрия, необходимых для повышения pH до 10,5–11. На основании полученных результатов разработана и предлагается для внедрения схема удаления фосфора с получением осадка, который после стабилизации и обезвреживания может использоваться в качестве органоминерального удобрения в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: сточная жидкость, фосфор, возвратный поток, внутриплощадочная канализация.

Введение

С развитием городов и промышленности увеличилось негативное воздействие на окружающую среду, в частности на водные объекты. Одним из последствий антропогенного влияния на водоемы является их эвтрофирование или «цветение», вызванное поступлением и увеличением биогенных элементов. Основные источники антропогенного поступления биогенных веществ в воду — неочищенные или недостаточно очищенные хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды [11, 14, 20]. Поверхностный сток с городских территорий и сброс неочищенных сточных вод с танкеров, барж, лайнеров в результате судоходства можно считать второстепенными, так как их доля незначительна. В результате этого снижается эстетическая и рекреационная ценность водоемов, наблюдается массовый замор рыбы в результате нарушения кислородного баланса, ухудшаются органолептические свойства воды и др.

На основании многочисленных исследований по удалению биогенных веществ из сточных вод был установлен факт преобладающего воздействия на эвтрофирование водоемов фосфора [4, 5, 21]. При концентрациях фосфора до 0,2 мг/дм³ «цветение» водоемов невозможно, поэтому для торможения процесса эвтрофирования в первую очередь необходимо удалять соединения фосфора.

Фосфор, содержащийся в сточных водах, может присутствовать в форме растворенного неорганического ортофосфата и полифосфата, растворенного органического фосфора, органического фосфора во взвешенных веществах. Суммарное количество перечисленных соединений представляет собой общий фосфор [10, 13, 19].

to introduce lime with the ratio P:Ca²⁺ = (1–1.5) and sodium hydroxide, required to raise the pH level to 10.5–11. Based on the obtained results, a scheme for phosphorus removal and sludge obtaining has been developed and proposed for implementation. After stabilization and neutralization, the sludge can be used as an organic-mineral fertilizer in agriculture.

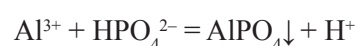
Keywords: wastewater, phosphorus, return flow, on-site sewage.

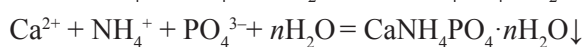
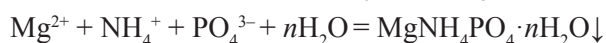
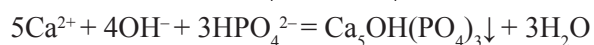
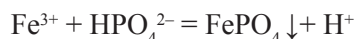
Существует несколько методов удаления фосфора из сточной жидкости: физический, физико-химический, биологический и комбинированный [3; 8].

К физическим методам относится отстаивание, в результате которого задерживаются взвешенные вещества, содержащие органический фосфор. Эффективность данного метода не превышает 5–10 %. В ряде случаев при несвоевременной выгрузке сырого осадка (СО) и его гниении происходит даже увеличение концентрации фосфора в осветленной сточной жидкости, поступающей в сооружения биологической очистки.

Как известно, фосфор в определенных количествах необходим для построения любой живой клетки. В основе биологического метода удаления фосфора лежит способность микроорганизмов рода *Acinetobacter* использовать на синтез клетки большее количество фосфора. Несмотря на всю свою экологичность (именно биологический метод — самый экологичный) данный метод имеет ряд серьезных недостатков: низкий эффект очистки сточной жидкости от фосфора (не более 70 %), наличие большого количества рециклов.

Среди физико-химических методов наибольшее распространение получил реагентный метод. В основу реагентного метода положено химическое взаимодействие положительно заряженных ионов металлов вводимых реагентов со свободными ион-фосфатами (PO₄³⁻), присутствующими в сточной жидкости, с образованием труднорастворимых солей ортофосфорной кислоты с последующим осаждением в отстойниках физико-химической очистки.





Альтернативным способом ввода реагентов для удаления фосфора может быть сорбция фосфатов на алюмосодержащей загрузке фильтров доочистки [5, 7].

Физико-химический метод позволяет снизить фосфор до нормативных показателей на разных этапах очистки сточных вод. Однако, несмотря на высокую эффективность метода, главный его недостаток — неэкологичность за счет вторичного загрязнения ионами металлов, а также сульфатами и хлоридами. Сдерживанием для широкого применения данного способа является высокая стоимость реагентов и большие объемы осадка. Также к основным недостаткам этого метода следует отнести зарастание аэраторов и образование в аэротенках и вторичных отстойниках залежей, загнивающих со временем и вызывающих вторичные загрязнения биологически очищенной сточной жидкости, быстрый износ трубопроводов, арматуры и оборудования.

Комбинированный способ очистки сточных вод от фосфора заключается в снижении фосфора на стадии биологической очистки и введении извести в иловую воду перед ее сбросом в «голову» сооружений. К существенным недостатком относится сложность внедрения на действующих ОСК, высокие строительные затраты узла удаления фосфора, а также большие объемы химического осадка за счет введения большого количества извести.

Цель настоящей работы — выявление мест обогащения сточных вод фосфором на Новосибирских ОСК и предложение простого способа его снижения с получением азотфосфорсодержащего осадка, пригодного для повторного применения.

Гипотетически снизить фосфор при сбросе стоков в водоем, если исключить прирост концентрации фосфора в приемной камере, который наблюдается в результате сброса стоков внутриплощадочной канализации, что позволит в сочетании с последующей биологической очисткой снизить фосфор до требуемых показателей.

Методы и материалы

Экспериментальные исследования проводились по следующей схеме: отобранные высококонцентрированные сточные воды разливались в требуемом объеме в конические колбы, при этом замерялись исходные величины основных химических показателей сточных вод, pH и температуры. Затем путем ввода гидроксида натрия создавалось требуемое значение величины активной реакции среды (9–11). После ввода NaOH пробы герметизировались и перемешивались в течение 20 минут на перемешивающем устройстве с максимальной частой колебаний. После перемешивания замерялась температура и pH сточной жидкости, замерялись остаточные концентрации фосфора и других показателей (после фильтрования через бумажный фильтр «синяя лента»). Измерение pH производилось переносным pH-метром-термометром «НИТРОН». Определение значений концентраций фосфора и других химических показателей осуществлялось с использованием экспресс-тестов LCK на спектрофотометре DR3900 немецкой фирмы Lange. При проведении экспериментов контролировались следующие показатели: фосфор фосфатов, азот аммонийный, азот нитратный, ХПК, хлориды, сульфаты, кальций, магний и жесткость, а также концентрация взвешенных веществ.

Исследования проводились в 2015–2019 гг. с использованием реальных сточных вод, отобранных на Новосибирских ОСК.

Результаты исследования и обсуждения

Большинство ОСК на территории России запроектированы и возведены в период 1960–1980-х годов. При разработке технологических схем были включены сооружения, являющиеся местами интенсивного обогащения стоков фосфатами, такие как: первичные отстойники с подачей в них избыточного активного ила для его уплотнения, преаэраторы в сочетании с первичными отстойниками, регенераторы аэротенков, сооружения по уплотнению, стабилизации и обезвоживанию осадков сточных вод [2; 15–17]. Ниже описывается технологическая схема Новосибирских ОСК и фактические значения в высококонцентрированных сточных водах внутриплощадочной канализации (табл. 1), образующиеся в результате обработки осадков сточных вод. Новосибирские очистные сооружения канализаци-

ции являются важнейшим природно-охранном комплексом и третьим по своей производственной мощности в стране, где очищаются сточные воды Новосибирской агломерации в объеме около 500 тыс. м³/сут, а в паводковый период — до 650 тыс. м³/сут. Сбрасываемая биологически очищенная сточная жидкость имеет среднегодовую концентрацию фосфора 2–3 мг/дм³ (здесь и далее по P-PO₄³⁻). При этом ПДК для сброса в рыбохозяйственные водоемы I категории составляет 0,2 мг/дм³. С 1 января 2019 г. МУП г. Новосибирска «Горводоканал» переходит, как и все предприятия водопроводно-коммунального хозяйства, на технологическое нормирование. В области очистки сточных вод предприятие, в случае утверждения на государственном уровне, будет обязано достигать технологических показателей наилучших доступных технологий (НДТ), установленных в информационно-техническом справочнике ИТС 10–2015 [18]. В данном справочнике в зависимости от мощности станции очистки и водоема-приемника очищенных сточных вод приводятся технологии очистки сточных вод и обработки осадков, отвечающие современным требованиям очистки. Так, концентрация фосфора фосфатов нормируется на уровне 0,7 мг/дм³ для НДТ 7д–7ж, а для других НДТ — еще выше или вовсе не нормируются. Лишь для НДТ 6в, 6г, 6д и 9а концентрация фосфора фосфатов нормируется на уровне 0,5 мг/дм³. Данный показатель ощутимо мягче, чем ПДК = 0,2 мг/дм³.

Поступающие сточные воды проходят несколько этапов очистки — механическую, биоло-

гическую очистку в аэротенках с последующим УФО-обеззараживанием и сбрасываются в реку Обь. Как видно из табл. 1, на Новосибирских ОСК основными сооружениями, в которых наблюдается высокая концентрация фосфора являются сооружения по обработке осадков: илоуплотнители ИАИ, метантенки, уплотнители СО, цех механического обезвоживания осадка и иловые площадки. Необходимо отметить, что значения концентраций характерны для профильтрованных проб.

В соответствии с принятой схемой обработки осадков избыточный активный ил (ИАИ) подается в радиальные уплотнители для снижения объемов. Уплотненный активный ил (УАИ) подается в цех механического обезвоживания осадка на ленточные сгустители. Сырой осадок (СО) из первичных отстойников поступает в метантенки, где подвергается обработке в анаэробных условиях. УАИ может, при необходимости, направляться для совместного анаэробного сбраживания с СО в метантенк.

При уплотнении в илоуплотнителях происходит увеличение концентрации фосфора в иловой воде за счет быстрого погружения активного ила в бескислородные условия. В метантенках иловая вода анаэробноброженного осадка обогащается фосфором в основном за счет распада органических веществ и макро- и микронуклеусов микроорганизмов и простейших.

До недавнего времени для обезвоживания УАИ использовались центрифуги, а для смеси СО и УАИ — фильтр-прессы. Однако из-за боль-

Таблица 1

Показатели качества сточной жидкости Новосибирских ОСК

Места отбора проб	Показатели качества сточной жидкости					
	P-PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	N-NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	XПК, мг/дм ³	Ca ²⁺ , мг/дм ³	Mg ²⁺ , мг/дм ³	pH
Лоток после песколовки	2,6–4,5	26,2–43,0	200–465	62,7–80,0	16,0–18,5	6,7–7,2
Сборный лоток первичного отстойника	2,7–10,7	27,1–43,5	177–250	67,1–75,1	16,2–18,5	6,9–7,1
Иловая смесь из аэротенка	0,1–2,5	0,8–6,7	28,7–50	64,0–73,2	14,7–15,2	6,9–7,2
Сборный лоток вторичного отстойника	0,1–3,5	2,9–9,3	11,5–45	32,6–63,7	9,0–15,0	7,0–7,2
Сырой осадок, поступающий в цех механического обезвоживания осадков	10,0–57,3	34,0–63,0	1210–1720	79,1–144	21,4–32,6	5,9–6,2
Смесь иловой воды после уплотнителей СО и ИАИ	35,6–42,1	29,1–35,0	580–650	69,2–72,1	15,1–16,7	6,2–6,5
Иловая вода ИАИ	11,0–20,0	18,4–21,8	22–115	45,7–68,7	16,7–20,5	6,5–6,8
Фильтрат после фильтр-прессов	7,7–33,2	17,5–55,4	370–580	72,5–108	19,8–22,2	6,5–6,6
Фугат после центрифуг	18,1–75,0	36,0–205,0	370–860	55,6–111	22,1–40,9	6,3–6,9
Иловая вода с иловых площадок	18,4–34,1	56,0–85,0	140–200	–	–	7,0–7,1

шой открытой поверхности фильтр-прессов, вызывающей чрезмерную загазованность производственного помещения сероводородом, аммиаком, индолом и тиолами, весной 2018 г. они были заменены на декантеры Flottweg. В настоящее время все осадки ОСК подвергаются обезвоживанию в поле центробежных сил.

По проектной схеме в состав узла метантенков входят резервуар для промывки анаэробно сброженного осадка и осадкоуплотнители для сгущения промытого осадка перед его подачей на обезвоживание. Осадкоуплотнитель также является местом интенсивного обогащения иловой воды фосфором (концентрация фосфора может увеличиваться свыше 60 мг/дм³).

При вынужденной остановке цеха механического обезвоживания осадка для его обезвоживания используются аварийные иловые площадки, имеющие асфальтобетонное основание и оборудованные системой отвода поверхностной и дренажной воды. Стоит отметить, что поступление данного вида стоков в производственную канализацию площадки ОСК непостоянно, и в основном осуществляется в летний период. Согласно полученным данным (табл. 1) содержание фосфора в дренажных водах составляет с учетом разбавления дождевыми и талыми водами не более 35 мг/дм³.

Центрифугирование, как и фильтр-прессование, является причиной обогащения фугата и фильтрата фосфором. В первом случае это происходит за счет действия центробежной силы, способствующей при высокой скорости (3500–4500 об/мин) вращения ротора высвободить фосфор из клеток активного ила. Проведенные дополнительно лабораторные исследования по центрифугированию сырого осадка и активного ила подтвердили это. При центрифугировании и фильтр-прессовании увеличение концентрации фосфора в фильтрате происходит, по-видимому, вследствие того, что у бактерий и простейших нарушается проницаемость цитоплазматических мембран клеток или нарушается целостность клеток. В результате происходит выделение из клеток фермента (энзима), в состав которых входит углерод, фосфор, азот, кальций, магний. К таким ферментам можно отнести, например, киназы (фосфотрансферазы), катализирующие перенос фосфатной группы от молекулы АТФ на раз-

личные субстраты. Исходя из этого, при сбросе неочищенных возвратных потоков в приемную камеру Новосибирской станции аэрации и его смешении с исходным потоком, концентрация фосфора увеличивается примерно на 1–2 мг/дм³ и может достигать 4–5 мг/дм³.

Сброс в приемную камеру неочищенных вышеперечисленных высоконцентрированных сточных вод не только приводит к увеличению концентрации фосфора в исходном потоке, но и приводит к увеличению нагрузки на сооружения механической и биологической очистки сточной жидкости по взвешенным и органическим веществам.

Проведенные обширные исследования показали, что в иловых и дренажных водах, фугате и фильтрате, помимо высоких концентраций фосфора, наблюдаются повышенные значения ионов кальция и магния (табл. 1), которые способны удалять фосфор путем элементарного повышения рН жидкости гидроксидом натрия с образованием труднорастворимых двухосновных солей магния и кальция.

Концентрации фосфора в проведенных экспериментах по удалению фосфора из высоконцентрированных сточных вод внутриплощадочной канализации площадки ОСК были 8,4–132 мг/дм³. Ниже приводится ряд исследований по извлечению фосфора из иловой воды илоуплотнителей (с концентрацией фосфора 17,6 мг/дм³) и фугата с концентрацией фосфора фосфатов 42,6 и 75 мг/дм³. Остаточные концентрации фосфора и эффекты его удаления для $C_p = 17,6$ мг/дм³ представлены в табл. 2.

В пробах, соответствующих рН 10 и рН 11, были определены жесткость, концентрации кальция и магния, рассчитаны эффекты снижения данных показателей. Результаты измерений показали, что при рН 10 концентрация ионов кальция в пробе снизилась с 90,5 до 40,7 мг/дм³, а ионов магния с 20,1 до 18,9 мг/дм³. Таким образом, эффект удаления ионов кальция составил 55,5 %, а магния — 6 %. Общая жесткость при этом снизилась с 2,6 до 1,3 °Ж (эффект составил около 42 %). При рН 11 концентрация ионов кальция в пробе снизилась до 32,3 мг/дм³, а ионов магния до 15,6 мг/дм³. Следовательно, эффект удаления ионов кальция составил 64,3 %, а магния — 22,4 %. Общая жесткость снизилась до 1 °Ж (эффект составил около 53 %).

Таблица 2

Эффект удаления фосфора из иловой воды при вводе гидроксида натрия

Исследуемый диапазон pH	Начальная концентрация фосфора в иловой воде (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Начальная концентрация азота аммонийного в иловой воде (по N-NH ₄ ⁺), мг/дм ³	Начальная концентрация ХПК в иловой воде, мг/дм ³	Остаточные концентрации фосфора в пробах (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Эффект очистки по фосфору (Э _p), %
pH 9	17,6	41,8	85	3,40	80,7
pH 9,5				2,21	87,4
pH 10				1,55	91,2
pH 10,5				1,21	93,1
pH 11				0,70	96,0

Проведенные дополнительно исследования с применением только NaOH и относительно невысокими концентрациями фосфора в иловых водах (до 30 мг/дм³) выявили следующее: независимо от исходной концентрации фосфора в сточной жидкости наблюдается близкий эффект удаления фосфатов в зависимости от pH. Объединенные данные опытов с исходной концентрацией C_{Ca}=68,4–90,5 мг/дм³ и C_{Mg} = 15,8–22 мг/дм³ при pH > 10,5 показали, что эффект удаления кальция (Э_{Ca}) и магния (Э_{Mg}) составил 64,3–70,5 и 22,4–30,7 % соответственно. Остаточные концентрации фосфора в проведенных опытах при этом составили 0,59–0,92 мг/дм³. Азот аммонийный снизился до 20,8 мг/л.

Далее рассмотрим два опыта, проведенные с фугатом центрифуг. Для данного вида стоков характерны более высокие концентрации фосфора при относительно высоких значениях ХПК, азота аммонийного, взвешенных веществ и ионов жесткости. В табл. 3 приведены данные по удалению фосфора из фугата подщелачиванием NaOH. Физико-химические показатели качества фугата составили: фосфор 42,6 мг/дм³, ХПК —

411 мг/дм³, азот аммонийный — 100 мг/дм³, взвешенные вещества — 230 мг/дм³, кальций — 97,8 мг/дм³ и магний 30,6 мг/дм³. Температура и активная реакция среды во время проведения опытов составили соответственно 20,2 °C и 6,93 единицы.

В пробе, соответствующей pH 11, были определены концентрации кальция, магния и азота аммонийного, рассчитаны эффекты снижения данных показателей. Результаты измерений показали, что при pH 11 концентрация ионов кальция в пробе снизилась с 97,8 до 37,3 мг/дм³, а ионов магния с 30,6 до 17 мг/дм³. Таким образом, эффект удаления ионов кальция составил 61,9 %, а магния — 44 %. Дополнительно в этой же пробе была определена концентрация азота аммонийного, которая составила 59,4 мг/дм³ (эффект составил 40,6 %).

Следующий эксперимент был проведен также с фугатом, но при более высокой концентрации фосфора фосфатов (табл. 4). Концентрация N-NH₄⁺ составила 205 мг/дм³, взвешенных веществ — 380 мг/дм³, кальция — 101 мг/дм³, магния — 37,3 мг/дм³. Температура и pH соста-

Таблица 3

Эффект удаления фосфора из фугата при вводе гидроксида натрия

Исследуемый диапазон pH	Начальная концентрация фосфора в фугате (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Начальная концентрация азота аммонийного в фугате (по N-NH ₄ ⁺), мг/дм ³	Начальная концентрация ХПК в фугате, мг/дм ³	Остаточные концентрации фосфора в пробах (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Эффект очистки по фосфору (Э _p), %
pH 9	42,6	100	411	20,9	50,9
pH 9,5				15,8	62,9
pH 10				12,2	71,4
pH 10,5				10,5	75,4
pH 11				10,3	75,8

Таблица 4

Эффект удаления фосфора из фугата при вводе гидроксида натрия

Исследуемый диапазон pH	Начальная концентрация фосфора в фугате (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Начальная концентрация азота аммонийного в фугате (по N-NH ₄ ⁺), мг/дм ³	Начальная концентрация ХПК в фугате, мг/дм ³	Остаточные концентрации фосфора в пробах (по P-PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	Эффект очистки по фосфору (Э _p), %
pH 9	75	205	676	27,8	62,9
pH 9,5				25,5	66,0
pH 10				24,8	66,9
pH 10,5				23,9	68,1
pH 11				17,8	76,3

вили 19 °С и 6,9 соответственно. При pH 11 концентрация N-NH₄⁺ снизилась с 205 до 39 мг/дм³ (эффект составил 81 %), а кальций и магний снизились до 7,3 и 7,1 соответственно (Э_{Ca} = 92,8 % и Э_{Mg} = 81 %). Таким образом, в результате химического взаимодействия ион-фосфата с присутствующими в сточных водах ионами кальция и магния при высоких значениях pH происходит образование труднорастворимых комплексных соединений кальция и магния.

Как видно из табл. 3 и 4, при высоких значениях фосфора в стоках невозможно добиться снижения фосфатов до концентраций, соизмеримых с исходным потоком, поступающим от населенного пункта, позволяющим при смешивании с ним не увеличивать концентрацию по биогенным элементам только за счет связывания ион-фосфатов с ионами жесткости подщелачиванием. Для достижения концентраций фосфора ниже 5 мг/дм³ предлагается ввод извести в соотношении P:Ca²⁺ = (1–1,5) и гидроксида натрия, необходимых для повышения pH до 10,5–11. Максимальный расход NaOH (при pH 11) в опытах с иловой водой составлял около 300 мг/дм³, для опытов с фугатом — около 600 мг/дм³.

Благодаря физико-химической очистке производственных стоков и их сброса в голову ОСК в общем стоке снижаются значения не только фосфора, но и других показателей (аммоний, взвешенные вещества, ионы кальция, магния и др.), что повышает в целом эффективность работы ОСК.

На основании полученных данных была разработана и предлагается технологическая схема очистки высококонцентрированных сточных вод, образующихся в ходе обработки осадков, перед сбросом в голову очистных сооружений канализации, позволяющая в сочетании с биоло-

гической очисткой снижать фосфор в очищенной сточной жидкости, сбрасываемой в водный объект, до 0,5–0,7 мг/дм³. Данная схема изображена на рисунке 1.

Возвратные потоки сточных вод (иловая вода уплотнителей, фугат, фильтрат, дренажные воды с иловых полей), а также поступающие от санузлов и душевых, направляются на барабанные сита для задержания крупных включений, затем в резервуар-усреднитель. Усредненная по составу и расходу сточная жидкость направляется в камеру-реакции, в которую подается воздух и раствор гидроксида натрия в количестве, обеспечивающим повышение pH до 10,5–11. При необходимости перед подачей гидроксида натрия осуществляется ввод известкового молока из соотношения P:Ca²⁺ = (1–1,5). При таком значении pH происходит связывание ионов кальция и магния, присутствующих в сточной воде с ион-фосфатом в труднорастворимую соль ортофосфорной кислоты. Осаждение образовавшегося кристаллического и органического осадка происходит в отстойниках физико-химической очистки. Обедненные от фосфора стоки направляются в резервуар для сбора сточной жидкости и насосом перекачивается в приемную камеру ОСК, а образовавшийся в отстойниках осадок обезвоживается на фильтр-прессах и может использоваться в качестве органоминерального азотнофосфорного удобрения. В то же время при высоких значениях pH происходит дополнительно обеззараживание сточной жидкости и дегельминтизация осадка, а также предотвращение распространения запахов [1, 9, 12].

Заключение

Разработана простая в эксплуатации технологическая схема удаления фосфора из стоков

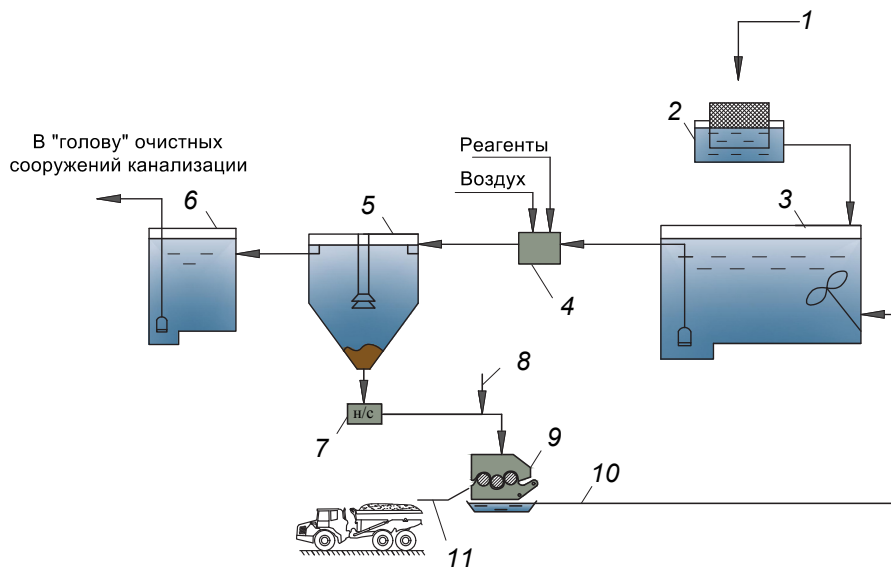


Схема узла физико-химической очистки сточных вод:
 1 — поступающие на физико-химическую очистку сточные воды; 2 — барабанное сито;
 3 — резервуар-усреднитель; 4 — камера реакции; 5 — отстойник физико-химической
 очистки; 6 — резервуар сбора очищенной сточной жидкости внутриплощадочной
 канализации; 7 — насосная станция; 8 — флокулянт; 9 — фильтр-пресс; 10 — фильтрат
 в резервуар-усреднитель; 11 — обезвоженный осадок (кек)

внутриплощадочной канализации, позволяющая снижать фосфор в очищенной сточной жидкости, сбрасываемой в водоем, до $0,5-0,7 \text{ мг/дм}^3$ при концентрациях фосфора до 30 мг/дм^3 путем ввода только гидроксида натрия, а при больших концентрациях фосфора возможен ввод извести в соотношении $\text{P}:\text{Ca}^{2+} = (1-1,5)$ и гидроксида натрия, необходимых для повышения pH до $10,5-11$.

В связи с переходом на технологическое нормирование целесообразно использование данного метода на стадии очистки высококонцентрированных внутриплощадочных сточных вод, так как при сбросе в приемную камеру данных стоков не будет происходить увеличения концентрации фосфора в сточной жидкости. Кроме этого в данном случае не требуется строительство дополнительных сооружений по снижению pH как при очистке в схеме с третичными отстойниками. Вызвано это тем, что объем сбрасываемых в голову сооружений стоков не превышает $5-10 \%$ от общей производительности станции, поэтому повышение pH после смешения поступающих и очищенных сточных вод внутриплощадочной канализации увеличится не более чем на $0,3-0,5$ единиц pH. Использование только гидроксида натрия позволяет снизить не только показатели

по фосфору, но и по азоту аммонийному и жесткости. Количество образующегося в ходе таких реакций осадка снижается в разы по сравнению с известью или любым другим реагентом. Образовавшийся химический осадок возможно использовать в качестве органоминерального азотнофосфорного удобрения, содержащего необходимые для растений макро- и микроэлементы. Недостатком данной схемы являются высокие эксплуатационные затраты на приобретение гидроксида натрия, так как NaOH дороже извести.

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что при внедрении данного узла на действующих ОСК г. Новосибирска увеличение себестоимости очистки стоков будет зависеть от времени года (летом концентрация фосфора больше), следовательно, затраты увеличиваются примерно на $0,5-0,8 \text{ руб. за м}^3$ сточной жидкости.

Благодарности

Данная работа была выполнена в рамках написания выпускной научно-квалификационной работы (диссертации). Автор выражает признательность за оказанную помощь при разработке отдельных вопросов сотрудникам МУП г. Новосибирска «Горводоканал»: начальнику службы канализации А. Р. Камалетдинову, ведущему ин-

женеру по эксплуатации ОСК Т. М. Гундыревой, начальнику ХБЛ ОСК М. Н. Смоляру.

Литература

1. Амбросова, Г. Т. (2017). Эффективность работы компактной установки для очистки высококонцентрированных стоков предприятия пищевой промышленности. В: III Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». Новосибирск: Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, сс. 244–253.
2. Амбросова, Г. Т., Матюшенко, Е. Н. и Синеева, Н. В. (2017). Места дефосфатирования городской сточной жидкости и эффект удаления фосфора реагентами. Вода и экология: проблемы и решения, № 4 (72), сс. 13–25. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.13–25.
3. Амбросова, Г. Т., Меркель, О. М., Бойко, Т. А., Хвостова, Е. В. и Перминов, А. А. (2003). Закономерности процесса дефосфатизации активного ила в анаэробных условиях. Известия вузов. Строительство, № 6 (534), сс. 73–78.
4. Амбросова, Г. Т., Функ, А. А., Иванова, С. Д. и Ганзориг, Ш. (2016). Сравнительная оценка применяемых методов удаления фосфора из сточной жидкости. Водоснабжение и санитарная техника, № 2, сс. 25–36.
5. Амбросова, Г. Т., Функ, А. А. и Матюшенко, Е. Н. (2016). Фосфор в сточных водах – анализ методов удаления. Вода Magazine, № 7 (107), сс. 32–35.
6. Амбросова, Г. Т., Матюшенко, Е. Н., Белозерова, Е. С., Гейсатдинов, Т. И., Нагорная, Т. В. и Функ, А. А. (2018). Способ удаления фосфора из сточной жидкости. Патент № 2654969.
7. Вильсон, Е. В. и Романенко, Е. Ю. (2015). Методологические аспекты физико-химического удаления фосфора из сточных вод на различных этапах очистки. Символ науки, № 11–1, сс. 16–20.
8. Воронов, Ю. В., Алексеев, Е. В., Пугачев, Е. А. и Саломеев, В. П. (2014). Водоотведение. М.: ИНФРА-М, 415 с.
9. Галанцева, Л. Ф. и Фридланд, С. В. (2010). Исследования эффективности очистки сточных вод г. Чистополя от фосфатов. Вестник Казанского технологического университета, № 2, сс. 311–314.
10. Гогина, Е. С. (2010). Удаление биогенных элементов из сточных вод. М.: МГСУ, 120 с.
11. Денисов, А. А., Баженов, В. И. и Кореньков, А. Д. (2011). Очистка сточных вод свинокомплексов от фосфора биологическим методом. Свиноводство, № 3, сс. 34–37.
12. Доскина, Э. П., Москвичева, А. В., Москвичева, Е. В. и Герашенко, А. А. (2018). Обработка и утилизация осадков городских сточных вод. Волгоград: ВолгГТУ, 186 с.
13. Залетова, Н. А. (2011). Особенности химического удаления фосфора при биологической очистке сточных вод. Водоснабжение и санитарная техника, № 11, сс. 40–46.
14. Зилов, Е. А. (2008). Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем). Иркутск: ИГУ, 138 с.
15. Иваненко, И. И. (2014). Результаты исследований возвратных потоков на очистных сооружениях с внедренной технологией биологического удаления азота и фосфора. Вода и экология: проблемы и решения, № 3 (59), сс. 51–62.
16. Иваненко, И. И. (2015). Исследования загрязнений обработки осадка на очистных сооружениях с глубоким биологическим удалением биогенов. Вестник гражданских инженеров, № 1 (48), сс. 165–171.
17. Колова, А. Ф., Пазенко, Т. Я. и Чудинова, Е. М. (2013). Реагентное удаление фосфатов из сливных вод. Вестник ИрГТУ, № 10 (81), сс. 161–163.
18. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (2015). ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Бюро НДТ, 377 с.
19. Ющенко, В. Д., Галузо, А. В. и Куприянич, Т. С. (2015). Анализ работы сооружений для удаления соединений фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки, № 3, сс. 115–119.
20. Ющенко, В. Д. и Галузо, А. В. (2015). Характеристика и выбор реагентов для удаления соединений фосфора из сточных вод. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки, № 16, сс. 121–125.
21. Guadie, A., Xia, S., Zhang, Z., Guo, W., Ngo, H. H. and Hermanowicz, S. W. (2013). Simultaneous removal of phosphorus and nitrogen from sewage using a novel combo system of fluidized bed reactor-membrane bioreactor (FBR-MBR). *Bioresource Technology*, vol. 149, pp. 276–285. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.09.007.

References

1. Ambrosova, G. T. (2017). Efficiency of a compact unit for treatment of highly concentrated effluents from a food industry enterprise. In: *3rd All-Russian Scientific Conference With International Participation "Energy and Resource Efficiency of Low-Rise Residential Buildings"*. Novosibirsk: Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pp. 244–253.
2. Ambrosova, G. T., Matyushenko, E. N. and Sineeva, N. V. (2017). Places of dephosphorization of urban wastewater and effect of removing phosphorus by reagents. *Water and Ecology*, No. 4 (72), pp. 13–25. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.13–25.
3. Ambrosova, G. T., Merkel, O. M., Boyko, T. A., Khvostova, E. V. and Perminov, A. A. (2003). Regularities in the process of phosphate removal from activated sludge under anaerobic conditions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, No. 6 (534), pp. 73–78.
4. Ambrosova, G. T., Funk, A. A., Ivanova, S. D. and Ganzorig, Sh. (2016). Comparative evaluation of the methods of phosphorus removal from wastewater. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 2, pp. 25–36.
5. Ambrosova, G. T., Funk, A. A. and Matyushenko, E. N. (2016). Phosphorus in wastewater - analysis of the removal methods. *Water Magazine*, No. 7 (107), pp. 32–35.
6. Ambrosova, G. T., Matyushenko, E. N., Belozerova, E. S., Geysaddinov, T. I., Nagornaya, T. V. and Funk A. A. (2018). *Method of phosphorus removal from the liquid effluents*. Patent No. RU2654969C1.
7. Vilson, E. V. and Romanenko, E. Yu. (2015). Methodological aspects of physical and chemical phosphorus

removal from wastewater at different stages of treatment. *Symbol of Science*, No. 11–1, pp. 16–20.

8. Voronov, Yu. V., Alekseev, E. V., Pugachev, E. A. and Salomeev, V. P. (2014). *Wastewater disposal*. Moscow: INFRA-M, 415 p.

9. Galantseva, L. F. and Fridland, S. V. (2010). Studying efficiency of phosphate removal from sewage in Chistopol. *Herald of Kazan Technological University*, No. 2, pp. 311–314.

10. Gogina, E. S. (2010). *Removal of nutrients from wastewater*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 120 p.

11. Denisov, A. A., Bazhenov, V. I. and Korenkov, A. D. (2011). Phosphorus removal from wastewater at pig-breeding farms of using the biological method. *Industrial & Pure-Bred Pig Breeding*, No. 3, pp. 34–37.

12. Doskina, E.P., Moskvicheva, A.V., Moskvicheva, E.V. and Gerashhenko, A.A. (2018). *Treatment and disposal of municipal sewage sludge*. Volgograd: Volgograd State Technical University, 186 p.

13. Zaletova, N. A. (2011). Specific characteristics of phosphorus removal in biological wastewater treatment. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 11, pp. 40–46.

14. Zilov, E. A. (2008). *Hydrobiology and water ecology (organization, operation and pollution of aquatic ecosystems)*. Irkutsk: Irkutsk State University, 138 p.

15. Ivanenko, I. I. (2014). Assessment of nitrogen and phosphorus removal from sludge treatment unit with deep biological nutrient removal at the WWTP of the city of Pushkin. *Water and Ecology*, No. 3 (59), pp. 51–62.

16. Ivanenko, I. I. (2015). Research of pollution resulting from sewage-sludge treatment at purification facilities with deep biological nutrient removal. *Bulletin of Civil Engineers*, No. 1 (48), pp. 165–171.

17. Kolova, A. F., Pazenko, T. Y. and Chudinova, E. M. (2013). Phosphate reagent removal from waste water.

Proceedings of Irkutsk State Technical University, No. 10 (81), pp. 161–163.

18. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology (2015). Information and technical reference book ITS 10-2015. *Wastewater treatment using centralized water disposal systems of settlements, urban districts*. Moscow: Byuro NDT, 377 p.

19. Yushchanka, V. D., Haluza, A. V. and Kupryianchyk, T. S. (2015). Analysis of work for removal of structures phosphorus compounds from wastewater aeration station the city of Vitebsk. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, No. 3, pp. 115–119.

20. Yushchanka, V. D. and Haluza, A. V. (2015). Description and selection of reagents for removal phosphorus compounds from wastewater. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, No. 16, pp. 121–125.

21. Guadie, A., Xia, S., Zhang, Z., Guo, W., Ngo, H. H. and Hermanowicz, S. W. (2013). Simultaneous removal of phosphorus and nitrogen from sewage using a novel combo system of fluidized bed reactor-membrane bioreactor (FBR-MBR). *Bioresource Technology*, vol. 149, pp. 276–285. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.09.007.

Автор

Матюшенко Евгений Николаевич

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия
E-mail: ematyushenko1991@mail.ru

Author

Matyushenko Evgeny Nikolaevich

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia
E-mail: ematyushenko1991@mail.ru