



:: Иловая площадка после вывоза почвогрунта [1]

Влияние тяжёлых металлов в стоках на процесс биологической очистки в аэротенках очистных сооружений

Рецензия эксперта на статью получена
21.10.2024 [The expert review of the article
was received on October 21, 2024]

Выполнение требований норм технологического режима при эксплуатации очистных сооружений имеет определяющее значение. В наибольшей степени это относится к процессу биологической очистки в аэротенках. В них, вследствие сочетания сложнейших биологических процессов и современных инженерных решений, по-прежнему остаётся множество до конца не выявленных аспектов, даже при соблюдении всех требований норм технологического режима.

Сложность контроля процесса биологической очистки и его регулирования многократно возрастает по причине непостоянного состава поступающих на очистку сточных вод и разнообразия составляющих элементов. Контроль состава и качества поступающих загрязнителей всегда затруднён и требует существенных затрат. Влияние изменения состава или превышения значений концентраций многих загрязнителей приводит к серьёзным нарушениям процесса очистки.

Основные факторы, влияющие на процесс очистки: загрязнители, которые косвенно определяются показателями химического потребления кислорода (ХПК) и биологического потребления кислорода (БПК), и их соотношение, водородный показатель pH, биогенные элементы, тяжёлые металлы, трудно определяемые, токсичные для активного ила вещества.

Большей частью выводы о воздействии тяжёлых металлов на микроорганизмы активного ила делаются на основании данных о превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) металлов в поступающих сточных водах. Величины данных ПДК в настоящее время определяются Постановлением Правительства РФ от 29 июля 2013 года №644 [2].

По результатам научных работ, выполненных в последние 20 лет и посвящённых исследованию влияния тяжёлых металлов на биологический процесс очистки, нельзя с уверенностью констатировать, что нарушение процесса явилось следствием воздействия тяжёлых металлов. Во всех случаях присутствовал фактор превышения величины ХПК над БПК, причём более чем в 2,5 раза. Превышение данного соотношения согласно действующему СП 32.13330.2018 [3] гарантировано приводит к нарушению структуры флоккул активного ила. Нашими исследованиями в течение 30 лет установлено, что нарушение процесса биологической очистки — биоценоза активного (зрелого) ила — наступает уже при превышении концентрации ХПК над БПК в 1,5 раза.

Проблеме влияния тяжёлых металлов на биологический процесс посвящено множество научных исследований, например [4–14]. Однако наиболее полно оно рассмотрено в трудах Н. С. Жмур.

УДК 628.356: Научная специальность: 2.1.4.

Влияние тяжёлых металлов, поступающих со стоками на очистные сооружения, на процесс биологической очистки в аэротенках

В. Б. Смирнов, д.т.н., инженер-эксперт АО «Воскресенские минеральные удобрения» (г.о. Воскресенск, Московская область); **Д. А. Гуськов**, начальник канализационных очистных сооружений г.о. Коломна (Московская область)

Описаны основные характеристики процесса биологической очистки в аэротенках с продлённой аэрацией, глубокой нитрификацией и симультанной денитрификацией. Приведены исследования влияния тяжёлых металлов, накопленных во флоккулах активного ила, на структуру флоккул. Определены значения концентраций тяжёлых металлов, при которых не происходит нарушений структуры флоккул и качества очистки стоков. Предложен существующий нормативный документ с этими значениями.

Ключевые слова: биологическая очистка, тяжёлые металлы, качество очистки сточных вод, продлённая аэрация, глубокая нитрификация, симультанная денитрификация, аэротенки, активный ил.

UDC 628.356: Scientific specialty 2.1.4.

The effect of heavy metals coming from wastewater treatment plants on the process of biological purification in aerotanks

V. B. Smirnov, Doctor of Technical Sciences, expert engineer of "Voskresensk Mineral Fertilizers", JSC (Voskresensk city district, Moscow region); **D. A. Guskov**, Head of Sewage Treatment Plants of Kolomna city district (Moscow region)

The main characteristics of the biological purification process in aerotanks with prolonged aeration, deep nitrification and simultaneous denitrification are described. Studies of the effect of heavy metals accumulated in activated sludge flocs on the structure of flocs are presented. The values of concentrations of heavy metals have been determined, at which there are no violations of the structure of flocs and the quality of wastewater treatment. An existing regulatory document with these values is proposed.

Keywords: biological purification, heavy metals, wastewater treatment quality, prolonged aeration, deep nitrification, simultaneous denitrification, aerotanks, activated sludge.

:: Концентрации тяжёлых металлов в активном иле очистных сооружений

табл. 1

Элемент	Макс. концентрация тяжёлых металлов в иловых осадках очистных сооружений г.о. Воскресенск в XXI веке, мг/кг	Очистные сооружения города Новосибирска, мг/кг	Очистные сооружения города Москвы (среднее значение), мг/кг	Очистные сооружения города Челябинска, мг/кг	Очистные сооружения города Казани, мг/кг	Очистные сооружения городов Республики Беларусь, мг/кг	Очистные сооружения городов Швеции, мг/кг
Кадмий	2	31	91	слёды	0,01	н.д.	1,0
Медь	650	1960	1600	3350	33	1200	550
Никель	40	290	365	1317	217	н.д.	18
Ртуть	0,4	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Свинец	20	295	611	2399	0,1	н.д.	44
Цинк	470	3460	4000	31 000	н.д.	670	598
Мышьяк	30	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Хром	н. д.	1623	2800	2260	346	140	н.д.

В работах [7, 12] приведён большой массив данных, полученных при проведении исследований по накоплению тяжёлых металлов в активном иле в пересчёте на сухое вещество. Проведено сравнение значений концентраций тяжёлых металлов в возвратном иле очистных сооружений многих городов России, Республики Беларусь, Европы и США. Сводные данные представлены в табл. 1.

Этот показатель представляется более информативным и реальным по сравнению с концентрацией в водном растворе. Это значение по существу является наиболее постоянным во времени. Лучше характеризует процесс накопления тяжёлых металлов в иле сверх каких-то предельных значений. Однако предельно-допустимых концентраций для нашей страны Н.С. Жмур в своих работах не приводит. Ссылки в её статье на то, что в городах Беларуси начиналось нитчатое вспухание при превышении некоторых значений по цинку, меди, кобальту, вероятно, зависят от превышения удельных нагрузок и соотношения ХПК/БПК.

В работах [10, 14, 15], выполненных в университетах Республики Беларусь на

сточных водах городов Бреста, Гродно и Минска, выводы о влиянии тяжёлых металлов также некорректны. Во всех случаях превышены удельная нагрузка и соотношение ХПК/БПК.

В данной статье предполагается установить влияние накопления тяжёлых металлов в активном иле и определить значения концентрации металлов, которые не приводят к нарушению структуры флоккул активного ила.

Основанием служит опыт эксплуатации крупных очистных сооружений г.о. Воскресенск в течение последних 40 лет и исследования, проведённые на реальных сточных водах за это время специалистами ОАО «НИИ КВОВ», Сельского-

Биоценоз активного ила представлен флоккулирующими формами бактерий. Простейшие представлены более 40 видами. Во множестве присутствуют микроорганизмы третьего трофического уровня (хищники, коловратки, тихоходки, сосущие инфузории)

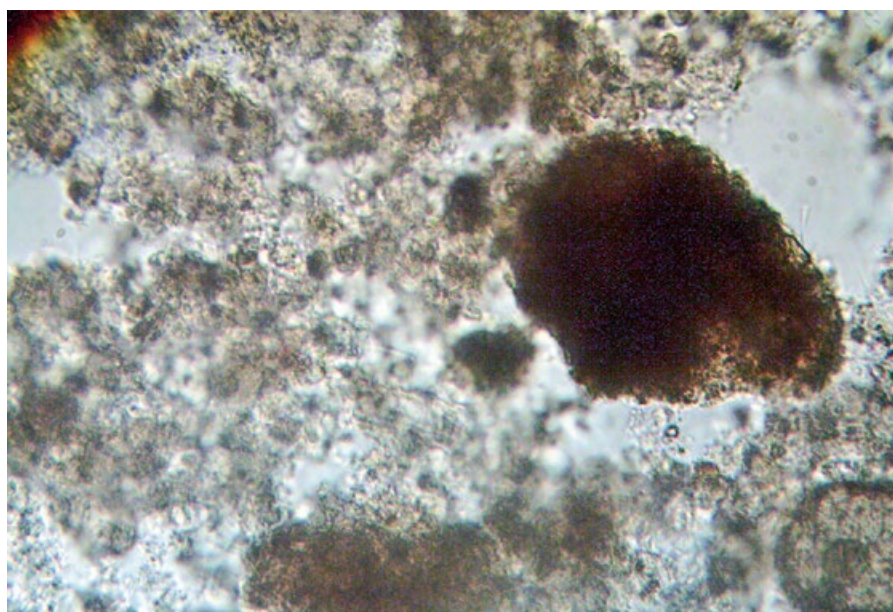
хозяйственной академии имени К.А. Тимирязева (ТСХА), ООО «Бифар». Работы были посвящены глубокому исследованию процесса очистки в аэротенках и последующему обезвоживанию иловых осадков, их стабилизации и повторному использованию в полном объёме от образовавшегося количества.

В цехе нейтрализации и очистки промышленных сточных вод (НиОПСВ) предприятия АО «Минудобрения» (очистные сооружения г.о. Воскресенск) в полной мере реализован процесс очистки биоценозом зрелого ила (илом большого возраста, с большой дозой ила).

Активный ил имеет следующие характеристики:

- нагрузка по БПК — 40–100 мг на грамм сухого вещества БПК в сутки;
- нагрузка по ХПК — 100–300 мг на грамм сухого вещества ХПК в сутки;
- весовая доля ила в иловой смеси — 4–8 г/л;
- концентрация растворённого кислорода в аэротенке — 4–6 мг/л;
- период аэрации — 10–16 часов;
- коэффициент рециркуляции — 0,8–1,2;
- расход стоков — 60–80 тыс. м³/сут.;
- концентрация растворённого кислорода во вторичных отстойниках — 1,6–2,1 мг/л;
- удельный расход воздуха на процесс аэрации — 5–7 м³/м³;
- удельный расход электроэнергии на процесс аэрации — 0,12–0,18 кВт/м³.

Биоценоз активного ила представлен флоккулирующими формами бактерий. Простейшие представлены более 40 видами. Во множестве присутствуют микроорганизмы третьего трофического уровня (хищники, коловратки, тихоходки, сосущие инфузории). Высока эффективность удаления тяжёлых металлов: так, например, по меди — 97–98 % (при значении на входе и выходе 0,5 и 0,002 мг/л, соответственно), по цинку — 97–98 % (значения на входе и выходе 0,1 и 0,003 мг/л), по железу — 96–97 % (значения на входе и выходе до 6,0 и 0,2 мг/л). На фото 1 показан зрелый, хорошо флоккулированный ил.



:: Фото 1. Зрелый, хорошо флоккулированный ил

На фото 2 представлен флоккулированный, минерализованный ил с кутикулой тихоходки. На фото 3 — водный гриб.

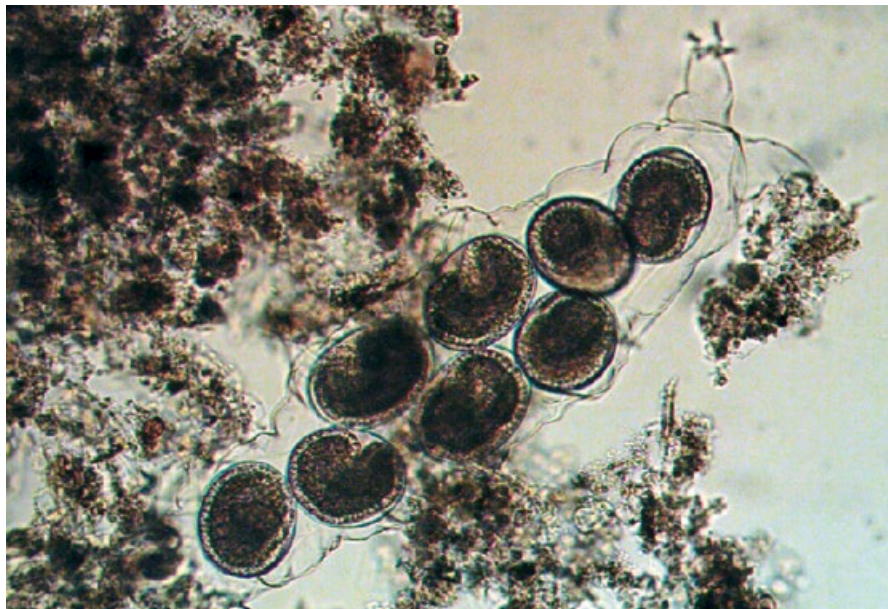
Основной причиной сброса недостаточно очищенных и не соответствующих нормам очистки стоков является вынос активного ила из вторичных отстойников в результате патологического нарушения структуры активного ила. По данным службы эксплуатации, это имело место в 90 % случаев. Также причиной может являться неисправность оборудования, однако это довольно легко устранимо. Другой причиной является способность незрелого активного ила к патологическим изменениям структуры ила от малейших изменений качественного состава поступающих на очистку стоков.

Существует шесть патологических нарушений структуры флоккул активного ила, которые препятствуют его отстаиванию, а в конечном итоге приводят к потере до 80 % его массы, нарушению биологической очистки в течение нескольких месяцев. Это вспухание, вспенивание, всплывание, диспергирование, микрофлоккуляция и дефлоккуляция

В условиях невозможности оперативного контроля за предприятиями-абонентами необходимо использовать процессы, устойчивые к токсичным и ингибирующим очистку сбросам сточных вод. Таким процессом является полная биологическая очистка от органических веществ с денитрификацией и симультанной денитрификацией (БНЧСД) — с низкими удельными нагрузками, большой дозой ила и большим возрастом ила.

Существует шесть патологических нарушений структуры флоккул активного ила, которые препятствуют его отстаиванию, а в конечном итоге приводят к потере до 80 % его массы, нарушению биологической очистки в течение нескольких месяцев. Это вспухание, вспенивание, всплывание, диспергирование, микрофлоккуляция и дефлоккуляция.

Вспухание — это преобладание нитчатых форм бактерий над флоккулированными или увеличение размеров флоккул (ветвистость). Под «всплыванием» подразумевается подъем частичек ила (в виде крупы) из отстойной зоны отстойника на поверхность. Вспенивание можно наблюдать как образование серой или коричневой пены при росте числа актиномицетов



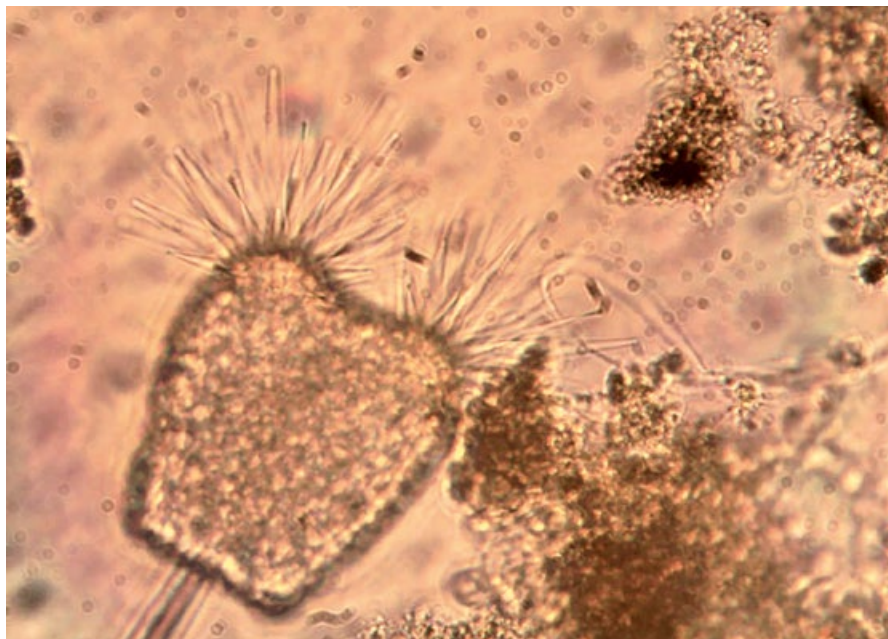
:: Фото 2. Флоккулированный, минерализованный ил с кутикулой тихоходки

в биоценозе вследствие неблагоприятных условий. Диспергирование представляет собой массовый рост бактерий, при котором размножающиеся бактерии утрачивают способность роста ворсинок, которыми соединяются во флоккулы. Микрофлоккуляцией называется нарушение флоккуляции, вызванное массовым развитием ювенильных (молодых) флоккул (зрелые флоккулы не образуются, под микроскопом флоккулы прозрачные). Дефлоккуляция — это распад флоккул на не оседающие части (фрагменты), при этом надлиловая вода непрозрачна, фрагменты также непрозрачны.

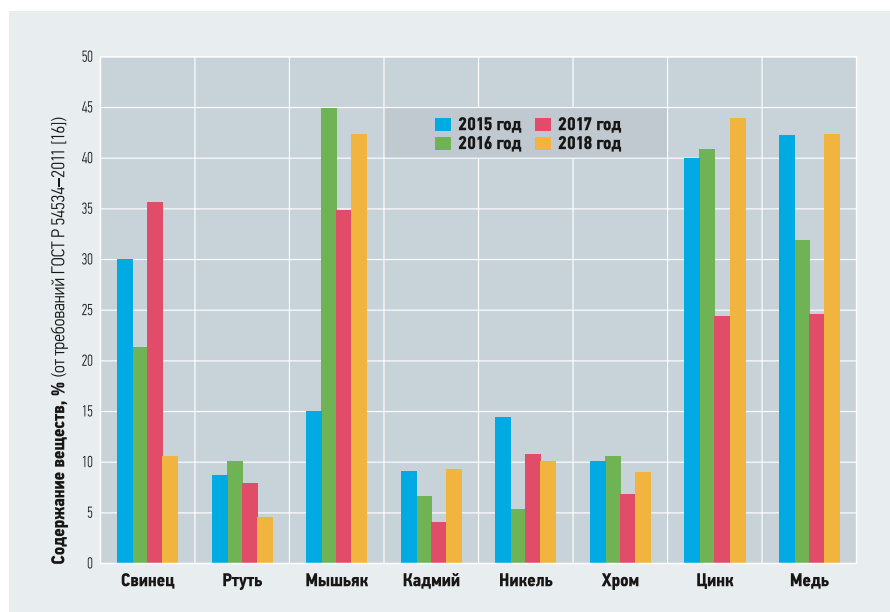
Перечисленные нарушения устранимы только при использовании в аэротенках зрелого, хорошо флоккулированного ила.

В течение многолетней эксплуатации технологического процесса БНЧСД отмечались случаи нитчатого вспухания активного ила при поступлении большой

концентрации аммонийного азота (50–100 мг/л) и одновременно большой концентрации ХПК (500–800 мг/л). Большое количество кислорода идет на окисление органических веществ, и по причине недостатка кислорода для процесса нитрификации её эффективность снижается до 40–50 %. Преимущество в развитии получают микроорганизмы с большой поверхностью для поглощения кислорода, то есть нитчатые. Иловый индекс возрастает до 150–220 мл/г. При прекращении сброса биоценоз восстанавливается в течение 5–10 периодов аэрации (три-пять суток). Гелевое вспухание ила наблюдается при поступлении больших концентраций ХПК и тяжёлых металлов. Иловый индекс возрастает до 150–200 мл/г в течение двух-трёх периодов аэрации. Биоценоз восстанавливается в течении 5–10 периодов аэрации после прекращения сброса.



:: Фото 3. Сосущая инфузория и ловчая петля хищного водного гриба вида *Zooph. tentaculum*



:: Рис. 1. Сравнение содержания тяжёлых металлов и мышьяка в иловых осадках очистных сооружений в процентах от требований ГОСТ Р 54534–2011 [16] (рис. 3 из [1])

Всплывание крупы во вторичных отстойниках происходит при поступлении аммонийного азота концентрацией выше 80–100 мг/л при невозможности увеличения концентрации кислорода выше 4–6 мг/л в одном или двух из четырёх работающих аэротенков. И при поступлении стоков концентрацией аммонийного азота более 50 мг/л и ХПК более 300–500 мг/л. Нарушение устраняется после прекращения сброса в течение двух-четырёх периодов аэрации. Всплывание не происходит при поступлении большой концентрации аммонийного азота и возможности увеличить концентрацию растворённого кислорода во всех аэротенках более 6 мг/л.

Плёнка на поверхности вторичных отстойников возникает при развитии актиномицетов рода *Microthrix*, как следствие начала нитчатого вспухания, описанного выше. Она наблюдается одновременно с образованием пены на поверхности аэротенков. Нитчатое вспухание обусловлено развитием актиномицетов, которые при всплывании образуют серую пену при поступлении аммонийного азота концентрацией более 50 мг/л и ХПК — более 400–500 мг/л. Проявляется через один-два периода аэрации. При прекращении поступления больших концентраций и вспенивание, и плёнка исчезают через период аэрации. При продолжительном поступлении больших концентраций этих веществ поверхность аэротенка не покрывается пеной более чем на 25–30 % площади поверхности аэротенков. При повышении концентрации растворённого кислорода в аэротенке более 5–6 мг/л вспенивание прекращается.

Образовавшаяся пена разлагается в течение 5–10 периодов аэрации.

Микрофлуккуляции и диспергирования за годы эксплуатации не наблюдалось. Редко наблюдались признаки дефлуккуляции (распада хлопков) при поступлении большой концентрации ХПК и низкой концентрации растворённого кислорода в одном из аэротенков. После прекращения сброса или увеличения концентрации кислорода в неисправном аэротенке признаки микрофлуккуляции исчезали через один-три периода аэрации.

В течение указанного периода времени проводился еженедельный контроль концентраций поступающих на очистные сооружения тяжёлых металлов.

В 1980-х годах регулярно проводился контроль состава и количества тяжёлых металлов в иловых осадках очистных сооружений с привлечением вышеперечисленных научно-исследовательских институтов. С начала 1990-х годов каждые три года проводится добровольная сертификация иловых осадков ООО «Бифар Экология» с участием Роспотребнадзора и лаборатории Центра лабораторного анализа и технических измерений по Центральному федеральному округу (ФГБУ «ЦЛАТИ по ЦФО»). Получен большой массив данных. Сопоставление результатов лабораторного контроля, гидробиологических наблюдений, процессов на очистных сооружениях и результатов определения концентраций накопленных в иловых осадках тяжёлых металлов позволяет судить о влиянии накопления тяжёлых металлов в иловых осадках на биологический процесс в аэротенках.

Концентрации тяжёлых металлов в иловых осадках очистных сооружений г.о. Воскресенск представлены на рис. 1 (рис. 3 из [1]).

Из приведённой диаграммы видно, что некоторое превышение нормы наблюдалось в 1990-е годы по мышьяку и хрому. В последующие годы нет превышений норм. В периоды превышения норм по мышьяку и хрому не наблюдалось нарушений структуры флоккул активного ила: вспухания (гелевого или нитчатого), всплывания или вспенивания. И тем более не наблюдалось серьёзных нарушений: микрофлуккуляции, дефлуккуляции, диспергирования. В последующие десятилетия концентрации тяжёлых металлов не превысила 50 % от нормы.



:: Процесс буртования осадка на иловой площадке [1]

:: Концентрации тяжёлых металлов в сточных водах г.о. Воскресенск в сравнении с нормативами

табл. 2

Элемент	ПДК тяжёлых металлов для биологической очистки, мг/л	Средние значения концентрации тяжёлых металлов на входе очистных сооружений г.о. Воскресенск, мг/л	Концентрации тяжёлых металлов на входе очистных сооружений г.о. Воскресенск в 1980-е годы, мг/кг	Максимальная концентрация тяжёлых металлов в иловых осадках в XXI веке, мг/кг	Норма концентрации тяжёлых металлов в осадке для биологической рекультивации, мг/кг	Норма концентрации тяжёлых металлов в иловых осадках для технической рекультивации, мг/кг	Норма концентрации тяжёлых металлов в иловых осадках, используемых в качестве удобрений в странах ЕС, мг/кг
Кадмий	0,015	0,001–0,01	2,0	3,8	30	60	40,0
Медь	1,0	0,05–0,01	650	400	750	1500	1500,0
Никель	0,25	0,02–0,05	40	66	400	800	400,0
Ртуть	0,005	0,0001–0,0002	0,4	0,0003	15	30	5,0
Свинец	0,25	0,02–0,04	20	250	500	1000	1000,0
Цинк	1,0	0,1–0,5	470	1100	3500	7000	3000,0
Мышьяк	0,05	0,04–0,1	30	4,0	20	40	–
Хром общий	0,5	1,0–1,5	530	40	1000	2000	1200,0

На основании данных по исследованию состава иловых осадков, состава поступающих на очистку сточных вод, данных по лабораторному контролю очищенных сточных вод, которые получены в течение 30–40 лет, составлена табл. 2.

Из приведённых в табл. 2 данных можно сделать следующие выводы:

1. Тяжёлые металлы, поступающие на биологическую очистку стоков, в концентрациях, не превышающих значений, указанных в Постановлении Правительства РФ №644 [2], не приводят к замещению флокулирующих форм бактерий филаментными. Они также не приводят к патологическим нарушениям структуры флоккул активного ила. Следует отметить, что допустимые концентрации тяжёлых металлов в [2] по многим элементам в несколько раз менее жёсткие, чем в ныне действующих нормах.

2. Накопление тяжёлых металлов в иловых осадках, которое происходит при таких концентрациях тяжёлых металлов, в поступающих сточных водах также не приводит к замещению флокулирующих форм бактерий ферментами.

3. Следовательно, норму содержания тяжёлых металлов в осадках сточных вод, используемых для технической рекультивации нарушенных земель, приведённую в ГОСТ Р 54534–2011 [16], можно считать допустимой нормой накопления тяжёлых металлов в активном иле, при которой тяжёлые металлы не оказывают токсического действия на биоценоз активного ила.

Предложен простейший способ определения одной из причин вспухания активного ила и последующих нарушений структуры флоккул — определение весовой концентрации тяжёлых металлов, накопленных активным илом

4. Нарушения биоценоза активного ила — структуры его флоккул, замещение зооглейных форм бактерий нитчатыми или водными грибами (фото 3), — начинается уже при превышении соотношения ХПК к БПК более чем в 1,5 раза.

При превышении данного соотношения ХПК к БПК более чем в 2,5 раза процесс вспухания активного ила приводит к возрастанию илового индекса до 200–230 мг/л, а время для восстановления биоценоза может составить более двух-трёх недель после прекращения сброса, как это показано в работе [9].

5. Предложен простейший способ определения одной из причин вспухания активного ила и последующих нарушений структуры флоккул — определение весовой концентрации тяжёлых металлов, накопленных активным илом. Если значение концентрации накопления в активном иле тяжёлых металлов не превышает значений норм, приведённых в ГОСТ Р 54534–2011 [16], тогда причиной вспухания следует считать нарушения соотношения ХПК/БПК, но не поступление со стоками таких металлов в повышенных концентрациях.

6. Тяжёлые металлы могут оказывать влияние на биоценоз и нарушать его при накоплении в активном иле нескольких тяжёлых металлов в концентрациях более 3000–5000 мг/кг. ●

- Смирнов В.Б., Гуськов Д.А., Беляева С.Д., Петров М.И. Подготовка и повторное использование осадков сточных вод на очистных сооружениях Воскресенска // Журнал СОК. 2018. №11. С. 22–27.
- Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ: Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 №644 (с изм. и доп.).
- СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения (с Изм. №1–3) / Дата введ.: 26.06.2019.
- Гюнтер Л.И., Беляева М.А., Юдина Л.Ф. Влияние технологических параметров работы аэротенков на формирование биоценозов и биохимические характеристики активного ила // Науч. труды Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1976. Вып. 105. С. 3–14.
- Шеломков А.С., Захватаева Н.В. Активный ил как управляемая экологическая система. — М.: Экспо-Медиа-Пресс, 2013. 286 с.
- Никитина О.Г. Биоэстимация: контроль и регулирование процессов биологической очистки и самоочищения воды. Автореф. дисс. доктора биологических наук по спец. 03.02.08, 03.02.10. — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 47 с.

- Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М.: Акварос, 2003. 512 с.
- Смирнов В.Б., Шевченко Н.П. Влияние поступающих со стоками тяжёлых металлов на очистные сооружения и процесс биологической очистки в аэротенках // Вода Magazine, 2018. №6. С. 12–14.
- Смирнов В.Б., Шевченко Н.П., Гуськов Д.А. Биоценоз активного ила аэротенков продлённой аэрации // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, 2021. №3. С. 54–63.
- Голуб Н.М. Анализ влияния сточных вод на гидробионты активного ила // Экологический вестник, 2017. №1. С. 20–25.
- Фролова С.Н., Козлова Г.А. Влияние тяжёлых металлов на активный ил при очистке сточных вод в режиме продлённой аэрации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ). Химические технологии и биотехнологии, 2010. №11. С. 180–191.
- Жмур Н.С. Новые аспекты причин вспухания активного ила на очистных сооружениях // Экология и промышленность России, 2011. №4. С. 44–50.

- Сибиева Л.Н., Сироткин А.С., Вдовина Т.В., Трёгл И., Бровдьева Т., Кобелева И.В. Элементарный анализ биомассы активного ила в процессах совместной биологической очистки сточных вод и оценки возможности её утилизации // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2018. №4. С. 184–191.
- Кирей В.А., Юхневич Г.Г. Влияние технологического режима аэротенков очистных сооружений канализации на видовой состав активного ила / Актуальные проблемы экологии: Мат. XII Межд. науч.-практ. конф. (г. Гродно, Республика Беларусь, 04–06.10.2017). — Гродно: ЮрСа-Принт, 2017. С. 208–210.
- Брылка Е, Марцуль В. Ограничение поступления тяжёлых металлов в компоненты природной среды с городскими сточными водами / Организационно-техническое управление в междотраслевых комплексах: Мат. II Межд. науч.-техн. конф. (г. Минск, РБ, 20–21.11.2007). — Минск: БГТУ, 2007. С. 446–450.
- ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель / Дата введ.: 01.01.2013.

References — see page 79.

The effect of heavy metals coming from wastewater treatment plants on the process of biological purification in aerotanks. Pp. 8–12.

Vsevolod B. Smirnov, Doctor of Technical Sciences, expert engineer of "Voskresensk Mineral Fertilizers", JSC (Voskresensk city district, Moscow region); **Dmitry A. Guskov**, Head of Sewage treatment plants of Kolomna city district (Moscow region)

1. V.B. Smirnov, S.A. Belyaeva, M.I. Petrov. *Podgotovka i povtornoje ispol'zovanie osadkov stochnykh vod na ochistnykh sooruzhenijakh Voskresenska* [Preparation and reuse of wastewater sludge at Voskresensk treatment facilities]. *Zhurnal Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 11. Pp. 22–27. [In Russian]
2. *Ob utverzhdenii Pravil kholodnogo vodosnabzhenija i vodootvedenija i o vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii* [On approval of the Rules for cold water supply and sanitation and on amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation]. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 29.07.2013 №644 (s izm. i dop.)* [The Decree of the Government Russian Federation No. 644 of July 29, 2013 (with amendments and additions)]. [In Russian]
3. SP 32.13330.2018 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 32.13330.2018]. *Kanalizatsija. Naruzhnye seti i sooruzhenija (s izm. №1–3)* [Sewerage. External networks and structures (with Amendments No. 1–3)]. Date of impl.: June 26, 2019. [In Russian]
4. L.I. Gunter, M.A. Belyaeva, L.F. Yudina. *Vlijanie tekhnologicheskikh parametrov raboty ajerotenkov na formirovanie biotsenozov i biokhimicheskie kharakteristiki aktivnogo ila* [Influence of technological parameters of aeration tanks on the formation of biocenoses and biochemical characteristics of activated sludge]. *Nauch. trudy Akademii komm. khoz-va im. K.D. Pamfilova* [Papers of the Pamfilov Academy of Public Utilities]. 1976. Issue 105. Pp. 3–14. [In Russian]
5. A.S. Shelomkov, N.V. Zakhvatueva. *Aktivnyj il kak upravljajemaja jekologicheskaja sistema* [Activated sludge as a controlled ecological system]. Moscow. *Jekspo-Media-Press* ["Expo-Media-Press" Publishers]. 2013. 286 p. [In Russian]
6. O.G. Nikitina. *Biojestimatsija: kontrol' i regulirovanie protsessov biologicheskoi ochistki i samoochishhenie vody* [Bioestimation: control and regulation of biological treatment processes and self-purification of water]. *Avtoref. diss. doktora biologicheskikh nauk po spets. 03.02.08, 03.02.10* [Abstract of the dissertation of Doctor of Biological Sciences in the specialties No. 03.02.08, 03.02.10]. Moscow. *MGU im. M.V. Lomonosova* [Lomonosov Moscow State University]. 2012. 47 p. [In Russian]
7. N.S. Zhmur. *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzhenijakh s ajerotenkami* [Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aeration tanks]. Moscow. *Akvaros* ["Aquaros" Publishers]. 2003. 512 p. [In Russian]
8. V.B. Smirnov, N.P. Shevchenko. *Vlijanie postupajushikh so stokami tjazhelykh metallov na ochistnye sooruzhenija i protsess biologicheskoi ochistki v ajerotenkakh* [The influence of heavy metals coming with wastewater on treatment facilities and the process of biological treatment in aeration tanks]. *Voda Magazine* ["Water Magazine" Magazine]. 2018. No. 6. Pp. 12–14. [In Russian]
9. V.B. Smirnov, N.P. Shevchenko, D.A. Gus'kov. *Biotsenoz aktivnogo ila ajerotenkov prodlennoj ajeratsii* [Biocenosis of activated sludge of extended aeration tanks]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie* ["Water purification. Water treatment. Water supply" Magazine]. 2021. No. 3. Pp. 54–63. [In Russian]
10. N.M. Golub. *Analiz vlijanija stochnykh vod na gidrobionty aktivnogo ila* [Analysis of the influence of wastewater on activated sludge hydrobionts]. *Jekologicheskij vestnik* ["Ecological bulletin" Magazine]. 2017. No. 1. Pp. 20–25. [In Russian]
11. S.N. Frolova, G.A. Kozlova. *Vlijanie tjazhelykh metallov na aktivnyj il pri ochistke stochnykh vod v rezhime prodlennoj ajeratsii* [The influence of heavy metals on activated sludge during wastewater treatment in the extended aeration mode]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta (PNIPU). Himicheskie tekhnologii i biotekhnologii* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Chemical technologies and biotechnology]. 2010. No. 11. Pp. 180–191. [In Russian]
12. N.S. Zhmur. *Novye aspekty prichin vspukhanija aktivnogo ila na ochistnykh sooruzhenijakh* [New aspects of the causes of activated sludge swelling at treatment facilities]. *Jekologija i promyshlennost' Rossii* ["Ecology and industry of Russia" Magazine]. 2011. No. 4. Pp. 44–50. [In Russian]
13. L.N. Sibieva, A.S. Sirotkin, T.V. Vdovina, J. Trögl, T. Brovdova, J.V. Kobeleva. *Jelemenarnyj analiz biomassy aktivnogo ila v protsessakh sovmestnoj biologicheskoi ochistki stochnykh vod i otsenki vozmozhnosti ee utilizatsii* [Elementary analysis of activated sludge biomass in the processes of joint biological wastewater treatment and assessment of the possibility of its utilization]. *Izvestija vuzov. Prikladnaja khimija i biotekhnologija* [News of Higher Educational Institutions. Series: Applied chemistry and biotechnology]. 2018. No. 4. Pp. 184–191. [In Russian]
14. V.A. Kirey, G.G. Yuhnevich. *Vlijanie tekhnologicheskogo rezhima ajerotenkov ochistnykh sooruzhenij kanalizatsii na vidovoj sostav aktivnogo ila* [Influence of the technological mode of aeration tanks of sewage treatment plants on the species composition of activated sludge]. *Aktual'nye problemy jekologii: Mat. XII Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of ecology: Proc. of the XII International scientific and practical conference] (Grodno city, Republic of Belarus, October 04–06, 2017). Grodno. *JurSa-Print* ["YurSa-Print" Publishers]. 2017. Pp. 208–210. [In Russian]
15. E. Brylka, V. Martsul'. *Ogranichenie postuplenija tjazhelykh metallov v komponenty prirodnoj sredy s gorodskimi stochnymi vodami* [Limiting the entry of heavy metals into the components of the natural environment with municipal wastewater]. *Organizatsionno-tekhnicheskoe upravlenie v mezhotraslevykh kompleksakh: Mat. II Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Organizational and technical management in intersectoral complexes: Proc. of the II International scientific and technical conference] (Minsk city, Republic of Belarus, November 20–21, 2007). Minsk. *BGTU* [Belarusian State Technological University]. 2007. Pp. 446–450. [In Russian]
16. GOST R 54534–2011 [State Industry Standard of Russia No. 54534–2011]. *Resursosberezhenie. Osadki stochnykh vod. Trebovanija pri ispol'zovanii dlja rekultivatsii narushennykh zemel'* [Resource conservation. Sewage sludge. Requirements for use in reclamation of disturbed lands]. Date of impl.: January 1, 2013. [In Russian]