

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА АКТИВНОГО ИЛА

И. Э. Головнёв¹

¹ Начальник испытательной лаборатории по контролю качества поверхностных и сточных вод, Филиал «Витебскводоканал» УП «Витебскоблводоканал», Витебск, Беларусь

Реферат

Представлены результаты исследования состава жидкой фазы иловых суспензий и сырого осадка, подвергнутых ультразвуковой обработке на установке с магнитострикционным излучателем и установке циркуляционного типа с гидродинамическим излучателем.

Установлено, что с увеличением концентрации активного ила степень деструкции твердой фазы уменьшается. Наблюдается тесная корреляция между увеличением ХПК жидкой фазы и потерей массы твердой фазы активного ила. Отношение $\Delta\text{БПК}/\Delta\text{ХПК}$ для жидкой фазы (фугат) при плотностях ультразвука 4,75 и 6,30 Вт/см³ мало зависит от плотности ультразвуковой энергии (ПУЭ) и находится в диапазоне 0,29–0,53. Для фильтрата это отношение составляет от 0,6 до 0,96. Причем тенденция роста этого показателя с увеличением плотности ультразвука и продолжительности обработки сохраняется.

Отношение $\Delta\text{БПК}/\Delta\text{ХПК}$ для жидкой фазы сырого осадка после ультразвуковой обработки остается выше 0,5 при ПУЭ 3,15; 4,70 и 6,30 Вт/см³ и имеет тенденцию к уменьшению с ростом времени обработки и, соответственно, удельных энергозатрат.

Установлено, что в результате ультразвукового воздействия на активный ил концентрацией 11,0 г/дм³ и 29,0 г/дм³ переход в жидкую фазу компонентов твердой фазы иловой суспензии способствует росту дегидрогеназной активности. Причем в большей степени это выражено для жидкой фазы, содержащей дисперсные частицы с размерами 0,2–20 мкм (фугат). Максимальному значению показателя дегидрогеназной активности соответствует степень повреждения простейших активного ила от 3 до 30% в зависимости от вида.

Ключевые слова: активный ил, сырой осадок, ультразвуковое воздействие, состав жидкой фазы, микробиологический анализ, ферментативная активность.

EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON DISPERSED COMPOSITION AND PROPERTIES OF ACTIVE SLUDGE

I. E. Golovnyov

Abstract

Results of investigation of composition of liquid phase of sludge suspensions and raw precipitate subjected to ultrasonic treatment at installation with magnetostriction radiator and installation of circulation type with hydrodynamic radiator are presented.

It has been found that as the concentration of active sludge increases, the degree of degradation of the solid phase decreases. There is a close correlation between the increase in COD of the liquid phase and the loss of weight of the active sludge solid phase. The ratio $\Delta\text{BPC}/\Delta\text{XPC}$ for liquid phase (fugate) at ultrasound densities 4.75 and 6.30 W/cm³ is little dependent on ultrasonic energy density (UIC) and is in the range 0.29–0.53. For the filtrate, this ratio is 0.6 to 0.96. At that, the trend of growth of this indicator with increase of ultrasound density and duration of treatment continues.

Ratio $\Delta\text{BPC}/\Delta\text{XPC}$ for liquid phase of raw precipitate after ultrasonic treatment remains higher than 0.5 at EIC 3.15; 4.70 W/cm³ and 6.30 W/cm³, and tends to decrease with increasing processing time and, accordingly, specific energy consumption.

As a result of ultrasonic action on active sludge with concentration of 11.0 g/dm³ and 29.0 g/dm³, transition to liquid phase of components of solid phase of sludge suspension is found to promote dehydrogenase activity growth. This is more pronounced for a liquid phase containing dispersed particles of 0.2–20 μm (fugate). The maximum value of dehydrogenase activity index corresponds to the degree of damage of the simplest active sludge from 3 to 30% depending on the species.

Keywords: Active sludge, raw precipitate, ultrasonic exposure, liquid phase composition, microbiological analysis, enzymatic activity.

Введение

В настоящее время применительно к очистным сооружениям канализации разработано значительное количество технических и технологических решений, обеспечивающих соблюдение жестких требований по содержанию в очищенных сточных водах загрязняющих веществ. Однако все они требуют существенных капитальных вложений и не всегда применимы в условиях действующих очистных сооружений.

В последнее время в технологии очистки сточных вод находят применение ультразвуковая обработка. Это обусловлено тем, что такая обработка интенсифицирует процессы диспергирования, фазового разделения, инициирует химические реакции в жидких средах различного состава.

Ультразвуковая обработка оказывает комплексное воздействие на биомассу активного ила. Наряду с дезинтеграцией надклеточных образований и переходом в жидкую фазу внеклеточных биополимеров наблюдается изменение состава фаз иловых суспензий за счет деструкции клеток активного ила и перехода в раствор внутриклеточных полимеров.

Большинство известных методов повышения эффективности биологической очистки основано на управлении процессами жизнедеятельности активной биомассы и ее последующего отделения от очищенных сточных вод.

Ультразвуковая предварительная обработка может способствовать увеличению активности ряда ферментов, увеличивая их доступность. Так, ультразвуковая обработка в течение 10 мин, при

плотности ультразвуковой энергии 3 Вт/см³ и частоте 20 кГц при 25°C, привела к увеличению активности ряда ферментов в 7 раз (за исключением α -амилазы, которая увеличилась в 2,2 раза) и инактивации некоторых других. В целом общая ферментативная активность была существенно повышена и зависела от времени обработки и плотности мощности [1]. Положительный эффект фазовой обработки достигается при определенном уровне ПУЭ. При низком уровне ПУЭ влияния на биологическую активность не наблюдается, а если ПУЭ превышает определенный порог, то может наблюдаться гибель микроорганизмов [2, 3].

Считается, что ультразвуковая обработка с ПУЭ больше 10 Вт/см³ может быть пагубной для микроорганизмов [4].

Стимуляция микробиологической популяции наблюдается в достаточно узком диапазоне интенсивности обработки. Не отмечалось заметного увеличения ферментативной активности, когда ПУЭ была ниже 0,5 Вт/см³ или выше 2 Вт/см³. Максимальная активизация ферментов наблюдается при интенсивности 1,5 Вт/дм³ при частоте 25 кГц. При более высокой интенсивности активизировались различные ферменты, в то же время при низкой интенсивности с увеличением продолжительности обработки усиливалась активность одного и того же фермента [1]. Обработка ультразвуком низкой частоты (25 кГц, 20 \pm 2 °C) более эффективная, чем высокой частоты (80 и 150 кГц) [5].

Считается, что положительное влияние ультразвуковой обработки на скорость биохимических превращений в определенной степени связано с перемешиванием, которое способствует ускорению фазовых

переходов и улучшению проницаемости клеточных мембран в результате ускорения роста микроорганизмов в иле. Увеличение активности микроорганизмов может быть ответной реакцией на механические воздействия и возникающие напряжение как в микроорганизмах, так и в других компонентах, присутствующих в водной среде [6].

Помимо перечисленных эффектов, ультразвуковая обработка сопровождается диспергированием и частичным переходом в жидкую фазу в виде растворенных веществ твердой фазы осадков, что было установлено в ранее выполненных исследованиях [7, 8]. В ранее проведенных исследованиях энергозатраты, как правило, не рассматриваются в качестве показателя, влияющего на активность биомассы. В связи с этим интерес представляет поиск зависимости между активностью биомассы, составом жидкой фазы и степенью деструкции твердой фазы иловых суспензий, в том числе активного ила.

Объектом исследований были образцы активного ила и сырого осадка, отобранные в разные периоды времени (2001–2014) на очистных сооружениях УП «Витебскводоканал» и УП «Минскводоканал». Исследования проводили на образцах активного ила и сырого осадка с использованием как магнитострикционного, так и гидродинамического излучателей. Обработку исследуемых образцов проводили в условиях, описанных в [8]. В условиях эксперимента для анализа использовали два варианта получения жидкой фазы обработанных ультразвуком образцов активного ила и сырого осадка: центрифугирование в течение 3 минут с частотой вращения 3000 мин⁻¹ (фугат) и фильтрование на микропористом фильтре с размером пор 0,2 мкм (фильтрат). Фугат отличается от фильтрата содержанием дисперсных частиц размерами 0,2–20 мкм.

Для оценки степени деструкции твердой фазы активного ила при ультразвуковой обработке проведена серия экспериментов, в ходе которых, наряду с ХПК жидкой фазы, определяли потерю массы твердой фазы активного ила, а также БПК фильтрата и фугата. Это позволило оценить выход ХПК на единицу потери массы твердой фазы и отношение БПК/ХПК.

Установлено, что с увеличением концентрации активного ила степень деструкции твердой фазы уменьшается. Наблюдается тесная корреляция между увеличением ХПК жидкой фазы и потерей массы твердой фазы активного ила.

Так, при обработке магнитострикционным излучателем при ПУЭ 6,30 Вт/см³ и концентрации активного ила 6,0 г/дм³ в фугат и фильтрат переходит 27,2 % и 8,4 %, для активного ила концентрацией 12,8 г/дм³ и такой же ПУЭ в фугат и фильтрат переходит 16,2% и 6,1% твердой фазы активного ила соответственно.

Имеется определенная закономерность в изменении отношения ΔХПК/ΔС, которое возрастает с увеличением энергозатрат. Причем большие значения этого отношения соответствуют большим концентрациям активного ила. Отношение ΔБПК/ΔХПК для жидкой фазы (фугат) при ПУЭ 4,75 и 6,30 Вт/см³ мало зависит от его величины и находится в диапазоне 0,29–0,53. Для концентрации 7,7 г/дм³ при ПУЭ 3,15 Вт/см³ с увеличением времени обработки это отношение увеличивается с 0,17 до 0,58. Возможно, это связано с переходом в жидкую фазу внеклеточных полимеров. При концентрации активного ила 16,3 г/дм³ с увеличением ПУЭ и времени обработки отношение

ΔБПК/ΔХПК имеет тенденцию к уменьшению.

Для фильтрата это отношение составляет от 0,6 до 0,96. Причем тенденция роста этого показателя с увеличением плотности ультразвука и продолжительности обработки сохраняется.

Обработку активного ила на установке циркуляционного типа с гидродинамическим излучателем (кавитатором) проводили при изменении времени обработки от 60 с до 20 минут. Для обработки с использованием гидродинамического излучателя циркуляционного типа зависимость прироста ХПК от энергозатрат носит линейный характер во всем диапазоне энергозатрат и близка к полученной для магнитострикционного излучателя при плотности ультразвука 3,15 Вт/см³.

В эксперименте для жидкой фазы обработанного ультразвуком сырого осадка определяли содержание ХПК, БПК и концентрацию твердой фазы. Фазовый и вещественный состав сырого осадка значительно отличается от активного ила, это отражается на результатах ультразвуковой обработки.

Как видно из результатов, представленных в таблице 1, с увеличением плотности ультразвука и времени обработки концентрация ЛЖК возрастает, как и показатели БПК и ХПК. При этом отношение БПК к ХПК несколько уменьшается с увеличением энергозатрат на ультразвуковую обработку.

При сопоставимом содержании загрязняющих веществ в твердой фазе активного ила и сырого осадка увеличение содержания ХПК, БПК для сырого осадка несколько меньше, но вклад растворенных веществ в эти показатели значительно больше.

Отношение ΔБПК/ΔХПК для жидкой фазы сырого осадка после ультразвуковой обработки остается выше 0,5 при использованных ПУЭ и имеет тенденцию к уменьшению с ростом времени обработки и, соответственно, удельных энергозатрат.

Биологическое действие ультразвука на клетки и ткани определяется главным образом интенсивностью ультразвука и длительностью облучения и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов активного ила. При повышении интенсивности ультразвука до значений, когда в среде возникают механические усилия, сравнимые с прочностью клеточных мембран, начинается процесс разрушения клеток. Эффект наблюдается, если амплитуда пульсации пузырьков возрастает до определенных величин.

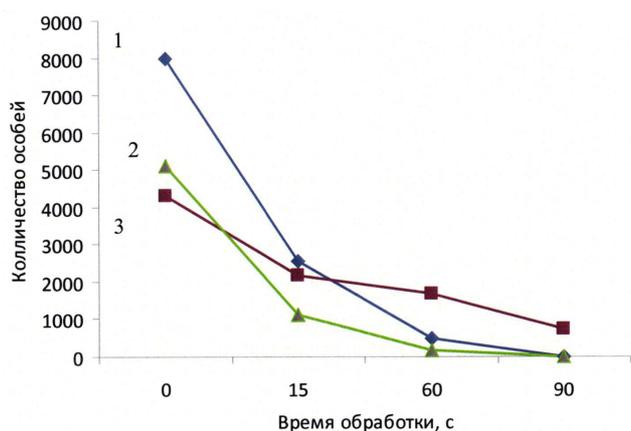
Микробиологический анализ активного ила показал, что с увеличением продолжительности ультразвуковой обработки происходит уменьшение количества живых особей простейших, таких как раковинные амёбы (*Arcellavulgaris*), брюхооресничные инфузории (*Aspidiscasp.*), свободноплавающие инфузории (*Trachelophyllopusillum*), мелкие и крупные жгутиконосцы (*Paranema trichophorum*) (рис. 1).

Для раковинных амёб характерно увеличение встречаемости разрушенных раковин. С увеличением времени обработки увеличивается количество поврежденных, деформированных и видоизмененных особей. Зависимость количества живых особей некоторых видов простейших и микроорганизмов в циркулирующем и избыточном активном иле (22,7 г/дм³) от продолжительности ультразвукового воздействия (до 90 секунд) приведена в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты исследования фильтрата сырого осадка (С-15,7 г/дм³) от энергозатрат на УЗ-обработку

ПУЭ, Вт/см ³	Продолжительность обработки, сек	Энергозатраты, Дж/г	ΔХПК, мгО ₂ /дм ³	ΔБПК, мгО ₂ /дм ³	ΔБПК / ΔХПК
3,15	5	998	413	230	0,56
	30	5992	2398	1630	0,68
	60	11924	3743	1945	0,52
	90	17977	4293	2130	0,50
	120	23069	4683	2380	0,51
4,70	5	1490	913	800	0,88
	30	8941	3263	2320	0,71
	60	17882	4163	2480	0,60
	19	26823	5123	2890	0,56
	120	35764	6083	2830	0,46
6,30	5	1997	1423	1120	0,71
	30	11985	3863	2162	0,56
	60	23970	4713	2530	0,54
	90	35954	5193	2780	0,54
	120	47939	6223	2840	0,46

Ультразвуковая обработка значительно влияет на качественный, количественный и видовой состав организмов активного ила.



1 – брюхоресничные инфузории; 2 – свободноплавающие инфузории; 3 – мелкие жгутиконосцы

Рисунок 1 – Динамика изменения численности живых особей простейших в зависимости от времени обработки ультразвуком (ПУЭ 3,15 Вт/см³)

Влияние ультразвукового воздействия на состояние живых особей в меньшей степени сказывается для уплотненного активного ила с большим содержанием твердых веществ.

При обработке активного ила с использованием гидродинамического излучателя изменение численности живых особей не так ярко выражено по сравнению с ультразвуковой обработкой с магнитострикционным излучателем.

На рисунке 2 представлена зависимость количества живых особей от количества циклов обработки на установке циркуляционного типа.

Один цикл обработки соответствует однократному прохождению активного ила через кавитатор установки. Для условий экспериментальной установки один цикл соответствует времени обработки 5 секунд.

Как видно из рисунка 2, численность живых особей после 5 циклов обработки линейно зависит от количества циклов обработки. При сравнимой обработке с применением магнитострикционного излучателя удельном расходе энергии использование гидродинамического излучателя оказывает более «мягкое» воздействие на микроорганизмы. С увеличением времени обработки коэффициент выживаемости (отношение уровней жизнеспособности микроорганизмов после обработки к исходным образцам) уменьшается.

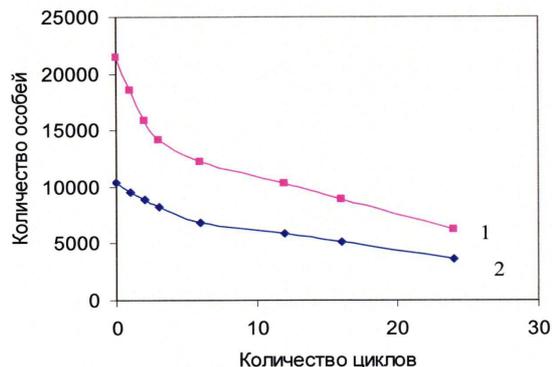
Одним из эффектов, который имеет место при ультразвуковой обработке активного ила, является изменение его ферментативной активности. Как отмечалось выше, при определенных условиях УЗ-обработки может наблюдаться как повышение, так и уменьшение этого показателя [3].

В экспериментальных исследованиях определяли влияние УЗ-обработки на дегидрогеназную активность (ДАИ) микроорганизмов

активного ила [9]. Исследования проводили с активным илом различной концентрации. Для определения ДАИ использовали фугат и фильтрат. Суммарная активность ферментов дегидрогеназ является показателем общей биологической активности ила. Дегидрогеназная активность ила обуславливается активностью самих микроорганизмов, а также количеством и степенью загрязненности среды и свидетельствует о достаточном содержании легкоокисляемых органических веществ в сточных водах. В качестве показателя активности использовали значение общей активности ила, $Y_{общ.}$, которое определяли количеством восстановленного формазана или беззольного вещества ила на 1 литр смеси ила, согласно формуле:

$$Y_{общ.} = a * 100,$$

где a – количество восстановленного формазана, мг;
100 – единица перевода мл в дм³.



1 – раковинные амебы; 2 – брюхоресничные инфузории

Рисунок 2 – Зависимость изменения количества живых особей от количества циклов ультразвуковой обработки

Зависимость дегидрогеназной активности ила от концентрации и энергозатрат на УЗ-обработку и плотности ультразвуковой энергии приведены на рисунках 3 и 4.

Установлено, что в результате ультразвукового воздействия на активный ил концентрацией 11,0 г/дм³ и 29,0 г/дм³ переход в жидкую фазу компонентов твердой фазы иловой суспензии способствует увеличению дегидрогеназной активности в 1,4 раза до определенного удельного расхода энергии до 20000 Дж/г. Причем в большей степени это выражено для жидкой фазы, содержащей дисперсные частицы размерами 0,2–20 мкм (фугат).

Сравнение результатов определения дегидрогеназной активности с результатами микробиологического анализа активного ила свидетельствуют о том, что максимальному значению этого показателя соответствует степень повреждения простейших активного ила от 3 до 30% в зависимости от вида.

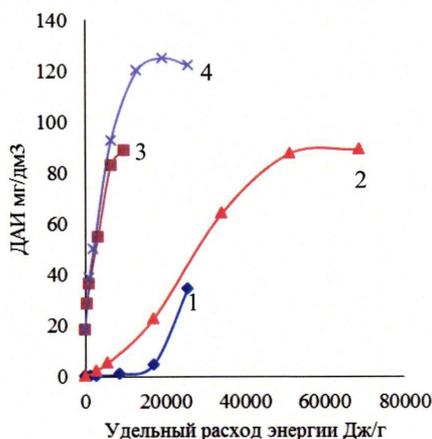
Заключение

В результате исследований установлено, что с увеличением концентрации активного ила степень деструкции твердой фазы, сопро-

Таблица 2 – Зависимость количества живых особей от продолжительности ультразвукового воздействия (плотность ультразвуковой энергии 3,15 Вт/см³)

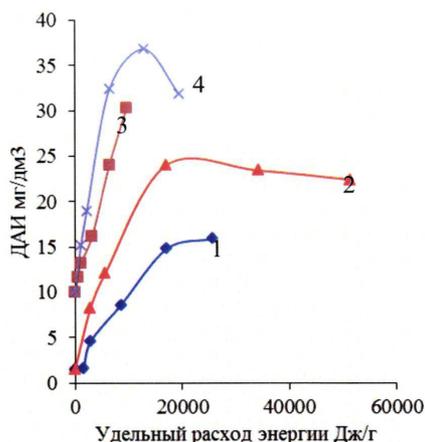
Наименование микроорганизмов	Концентрация активного ила г/дм ³													
	9,9						22,7							
	Время обработки, сек.													
	0	15	60	90	0	15	60	90	0	15	60	90		
Удельный расход энергии, Дж/г														
4773			19090			2081			8324			12486		
Кол-во живых особей														
шт.	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	шт.	%	шт.	%	шт.	%	
Раковинные амебы	20640	4000	19	1584	8	0	0	1920	1448	75	1200	62	480	25
Крупные жгутиконосцы	1600	1280	80	480	30	320	20	960	240	25	240	25	240	25
Мелкие жгутиконосцы	2660	852	32	480	18	320	12	4320	2160	50	1680	39	720	17
Брюхоресничные инфузории	8000	2560	31	480	6	480	6	1680	960	57	720	43	240	14
Свободноплавающие инфузории	5120	1120	22	160	3	0	0	1200	720	60	480	40	480	40
Коловратки	480	320	66	320	66	160	33	720	480	100	480	100	240	50
Голые амебы	160	0		0		0		320	0		0		0	
Сосущие инфузории	320	0		0		0		0	0		0		0	

возрастающей переход в жидкую фазу растворенных и дисперсных частиц размерами до 20 мкм, уменьшается. Наблюдается тесная корреляция между увеличением ХПК жидкой фазы и потерей массы твердой фазы активного ила. Отношение $\Delta\text{БПК}/\Delta\text{ХПК}$ для жидкой фазы (фугат) при плотностях ультразвука 4,75 и 6,30 Вт/см³ мало зависит от плотности ультразвуковой энергии (ПУЭ) и находится в диапазоне 0,29–0,53. Для фильтрата это отношение составляет от 0,6 до 0,96. Причем тенденция роста этого показателя с увеличением плотности ультразвука и продолжительности обработки сохраняется.



1 – ПУЭ 3,15 Вт/см³ фугат (С-11,0г/дм³); 2 – ПУЭ 6,30 Вт/см³ фугат (С-11,0г/дм³) 3 – ПУЭ 3,15 Вт/см³ фугат (С-29,0г/дм³); 4 – ПУЭ 6,30 Вт/см³ фугат (С-29,0г/дм³)

Рисунок 4 – Зависимость изменения ДАИ (фугат) от удельного расхода энергии



1 – ПУЭ 3,15 Вт/см³ фильтрат (С-11,0г/дм³); 2 – ПУЭ 6,30 Вт/см³ фильтрат (С-11,0г/дм³) 3 – ПУЭ 3,15 Вт/см³ фильтрат (С-29,0г/дм³); 4 – ПУЭ 6,30 Вт/см³ фильтрат (С-29,0г/дм³)

Рисунок 4 – Зависимость изменения ДАИ (фильтрата) от удельного расхода энергии

Отношение $\Delta\text{БПК}/\Delta\text{ХПК}$ для жидкой фазы сырого осадка после ультразвуковой обработки остается выше 0,5 при ПУЭ 3,15; 4,70 и 6,30 Вт/см³ и имеет тенденцию к уменьшению с ростом времени обработки и, соответственно, удельных энергозатрат.

В результате ультразвукового воздействия с удельным расходом энергии до 20000 Дж/г на активный ил концентрацией 11,0 г/дм³ и 29,0 г/дм³ переход в жидкую фазу компонентов твердой фазы иловой суспензии способствует росту дегидрогеназной активности. Причем в большей степени это выражено для жидкой фазы, содержащей дисперсные частицы с размерами 0,2–20 мкм (фугат).

Максимальному значению показателя дегидрогеназной активности соответствует степень повреждения простейших активного ила от 3 до 30% в зависимости от вида.

Результаты исследований могут быть использованы для выбора режима ультразвуковой обработки активного ила и сырого осадка с целью интенсификации работы действующих очистных сооружений канализации.

Список цитированных источников

1. YU, G. H. Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment / G. H. YU, P. J. HE, L. M. SHAO, Y. S. ZHU // Water Research. – № 42. – 2008. – P. 1925–1934.
2. LIU, H. Enhancement of organic pollutant biodegradation by ultrasound irradiation in a biological activated carbon membrane reactor / H. LIU, Y. HE, X. QUAN, Y. YAN, X. KONG, A. LIA // Process Biochemistry. – № 40. – 2005. – P. 3002–3007.
3. Xie, B. Improvement of the activity of anaerobic sludge / B. Xie, H. Liu, Y. Yan // Journal of Environmental Management. – 2009. – № 90. – P. 260–264.
4. Bougrier, C. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment / C. Bougrier, J. P. Delgenes, H. Carrere // Chemical Engineering Journal. – 2005. – № 106. – P. 163–169.
5. ZHANG, G. Using acoustic cavitation to improve the bio-activity of activated sludge / G. ZHANG, P. ZHANG, J. GAO, Y. CHEN // Bioresource Technology. – 2008. – № 99. – P. 1497–1502.
6. LIN, L. D. Enhancement of shikonin production in single and two-phase suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon* cells using low-energy ultrasound / L. D. LIN, J. Y. WU // Biotechnology Bioengineering. – 2002. – № 78. – P. 81–88.
7. Головнёв, И. Э. Влияние концентрации иловых суспензий на результаты ультразвуковой обработки осадка / И. Э. Головнёв, В. Н. Марцуй // Вестник Полоц. гос. ун-та. – Серия F : Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8.
8. Головнёв, И. Э. Использование ультразвуковой обработки для интенсификации и повышения эффективности биологической очистки сточных вод и улучшения свойств сырого осадка / И. Э. Головнёв, В. Н. Марцуй // Вестник Полоцкого гос. ун-та. – Серия B : Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 129–136.
9. Инструкция по лабораторному контролю очистных сооружений на животноводческих комплексах. – М. : Колос, 1984. – Ч. 3 : Определение биогенных веществ, анализ осадков и ила – 34 с.

References

1. YU, G. H. Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment / G. H. YU, P. J. HE, L. M. SHAO, Y. S. ZHU // Water Research. – № 42. – 2008. – P. 1925–1934.
2. LIU, H. Enhancement of organic pollutant biodegradation by ultrasound irradiation in a biological activated carbon membrane reactor / H. LIU, Y. HE, X. QUAN, Y. YAN, X. KONG, A. LIA // Process Biochemistry. – № 40. – 2005. – P. 3002–3007.
3. Xie, B. Improvement of the activity of anaerobic sludge / B. Xie, H. Liu, Y. Yan // Journal of Environmental Management. – № 90. – 2009. – P. 260–264.
4. Bougrier, C. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment / C. Bougrier, J. P. Delgenes, H. Carrere // Chemical Engineering Journal. – 2005. – № 106. – P. 163–169.
5. ZHANG, G. Using acoustic cavitation to improve the bio-activity of activated sludge / G. ZHANG, P. ZHANG, J. GAO, Y. CHEN // Bioresource Technology. – 2008. – № 99. – P. 1497–1502.
6. LIN, L. D. Enhancement of shikonin production in single and two-phase suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon* cells using low-energy ultrasound / L. D. LIN, J. Y. WU // Biotechnology Bioengineering. – 2002. – № 78. – P. 81–88.
7. Golovnyov, I. E. Influence of concentration of sludge suspensions on the results of ultrasonic treatment of sediment / I. E. Golovnyov, V. N. Marcul // Journal Polots. State – Series F : Construction. Applied sciences. – 2019. – № 8.
8. Golovnyov, I. E. Use of ultrasonic treatment to intensify and increase the efficiency of biological treatment of waste water and improve the properties of raw sludge / I. E. Golovnyov, V. N. Marcul // Journal of Polotsky State. – Series B : Industry. Applied sciences. – 2019. – № 3. – P. 129–136.
9. Instructions on laboratory control of treatment facilities at livestock complexes. – Moscow : Kolos, 1984. – Part 3 : Determination of biogenic substances, analysis of precipitation and sludge – 34 p.

Материал поступил в редакцию 05.03.2020