

УДК: 66.021.3: 628.356

Интенсификация аэрации и массопереноса в технологии очистки сточных вод за счет дискретно-импульсного ввода энергии

А.А. Долинский, А.Н. Ободович, В.В. Сидоренко

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

E-mail: tdsittf@ukr.net

В статье решаются проблемы применения теплофизики в охране окружающей среды, а именно в очистке сточных вод за счет интенсификации процесса массопереноса и ускорения реакции биологического окисления. Интенсификация происходит вследствие воздействия на обрабатываемую среду (сточную воду) вводимой дискретно-импульсным методом энергии. Метод реализуется посредством нового теплообменного оборудования, а именно: аэратора-окислителя роторного типа.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, аэратор-окислитель, частота пульсаций, скорость сдвига потока.

В настоящее время основную функцию по биологической очистке сточных вод от органических и биогенных загрязнений выполняют искусственные сооружения, в большей степени аэротенки различных технологических и конструктивных решений, оборудованные разнообразными системами аэрации. Согласно экспертным оценкам, от 60 до 80 % эксплуатационных затрат очистных сооружений приходится именно на проведение аэрации и массопереноса смеси сточной воды и активного ила. Гидродинамические условия аэрационных устройств определяют протекание массообменных процессов диффузионного растворения кислорода, что оказывает решающее влияние на скорость реакций биологического окисления.

С учетом вышеизложенного, целью представленной работы явилось исследование интенсификации процессов аэрации и массопереноса за счет нового, теплообменного оборудования, работающего по принципу дискретно-импульсного ввода энергии.

Для решения поставленной задачи в Институте технической теплофизики НАН Украины было создано новое теплообменное оборудование, работающее по принципу дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ). Данный метод был утвержден в 1984 г. Президиумом АН УССР как нетрадиционный метод интенсификации теплообменных процессов в дисперсных средах. Метод ДИВЭ был впервые предложен в работе [1] в качестве обобщающего метода направленного, локального и интенсивного использования концентрированной энергии в жидких дисперсных средах. Его идея состоит в том, чтобы стационарно введенную и произвольным образом распределенную в рабочем объеме энергию предварительно аккумулировать (сконцентрировать) в локальных дискретных точках системы и в дальнейшем импульсно реализовать для достижения необходимых теплофизических эффектов. Цель ДИВЭ состоит в интенсификации

теплообменных и гидродинамических процессов в технологических средах, а также создании методики оптимизации этих процессов и способов управления ими.

Применение метода ДИВЭ предполагает создание большого количества равномерно распределенных в дисперсной среде рабочих органов или рабочих элементов, которые трансформируют стационарную тепловую, механическую или другие виды энергии в энергетически мощные импульсы, дискретные во времени и в пространстве. Сопровождающие эти явления ударные волны, межфазная турбулентность, микрокавитация, вихри и проникающие кумулятивные микроструи вызывают на межфазных поверхностях неустойчивости типа Рэлея–Тейлора или Кельвина–Гельмгольца, что приводит к интенсивному дроблению дисперсных включений, значительному увеличению суммарной поверхности контакта фаз и повышению процессов массо- и теплопереноса. Подобные эффекты зачастую недостижимы при использовании традиционных методов при обработке дисперсных сред даже при существенно большем уровне удельных энергозатрат.

Механизмы ДИВЭ теоретически изучались в работах [2–4], а технологические и инженерные дополнения этого метода были представлены в исследованиях [5–7] и обобщены в [8, 9]. Реализуется метод ДИВЭ во многих видах теплообменного оборудования, но наиболее часто в роторно-пульсационных аппаратах различных конструкций [10].

Для интенсификации процесса аэрации и массопереноса в технологии очистки сточных вод в ИТТФ НАНУ был создан аэратор-окислитель роторного типа (АОРТ), схема которого представлена на рис. 1. Роторно-пульсационный узел (РПУ) аэратора-окислителя состоит из двух роторов, соединенных винтами и представляющих собой единый роторный узел (РУ), статора и рабочего колеса центробежного насоса (крыльчатки) (рис. 2). Роторы имеют следующие конструкторские характеристики: внутренний радиус малого ротора $R_{\text{мр}} = 56$ мм, большого — $R_{\text{бр}} = 66$ мм, ширина прорезей $a = 3,0$ мм, угол между

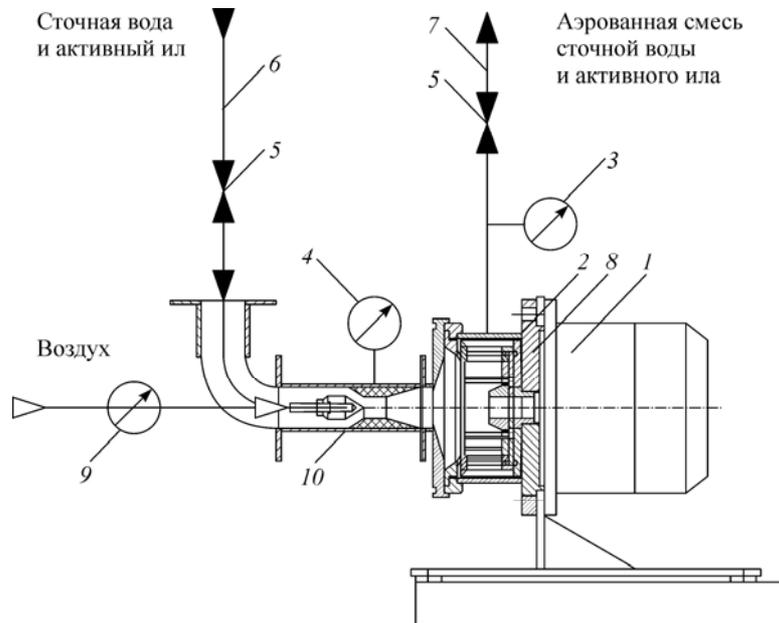
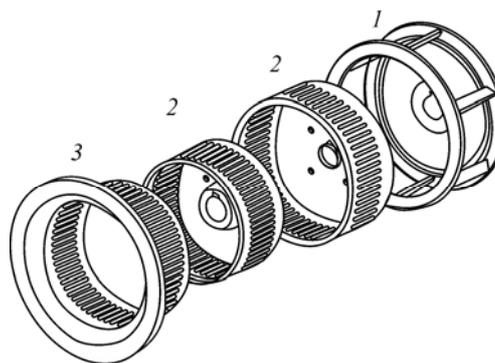


Рис. 1. Схема аэратора-окислителя роторного типа.

- 1 — электродвигатель, 2 — роторно-пульсационный узел,
- 3 — манометр для измерения давления на выходе РПУ,
- 4 — вакуумметр для измерения разряжения во входном патрубке,
- 5 — двухходовой кран, 6 — приемный трубопровод, 7 — выпускной трубопровод,
- 8 — корпус роторно-пульсационного аппарата,
- 9 — ротаметр, 10 — эжекторный узел.

Рис. 2. Рабочие органы роторно-пульсационного узла.

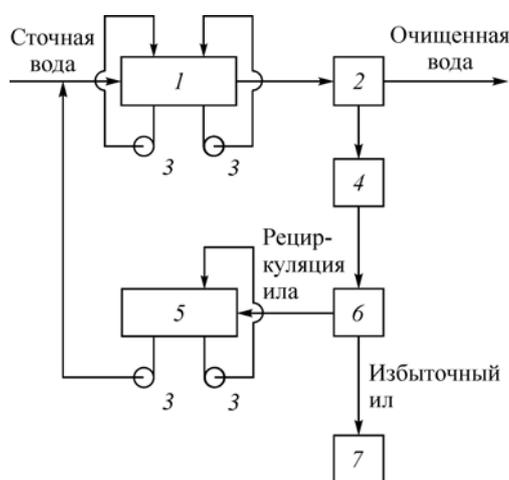
1 — рабочее колесо центробежного насоса,
2 — ротор, 3 — статор.



прорезьями в обечайках составляет 6° , высота прорезей $h_{пр} = 5$ мм, число прорезей прямоугольной формы $m = 60$. Диапазон изменения зазора между роторами и статором составляет $\delta = 0,3 \pm 0,5$ мм. Конструктивные характеристики статора следующие: радиус статора $R_{ст} = 61$ мм, ширина прорезей $a = 3,0$ мм, высота прорезей $h_{пр} = 5$ мм, число прорезей прямоугольной формы $m = 60$. Корпус роторно-пульсационного аппарата (РПА) смонтирован на фланце электродвигателя через присоединительный фланец. На свободный конец вала, имеющий внешнюю резьбу, через шпоночное соединение устанавливается роторный узел, фиксируемый на валу гайкой. Герметичность соединения вала двигателя и корпуса РПА обеспечивается манжетой.

Работа АОРТ осуществляется следующим образом. Через приемный трубопровод 6 (см. рис. 1) смесь сточной воды и активного ила направляется в РПА. Рабочее колесо центробежного насоса, вращаясь, создает во входном патрубке разрежение, за счет которого атмосферный воздух подается в систему. Двухходовой кран 5 позволяет регулировать подачу воздуха. Таким образом, формируется водовоздушная смесь, которая, проходя через РПУ, подвергается воздействию ударных волн, межфазной турбулентности, микрокавитации и вихрей, что приводит к интенсивному дроблению пузырьков воздуха, дисперсных включений и увеличению площади поверхности контакта фаз. Благодаря этому увеличивается скорость массопереноса кислорода из газовой фазы в жидкую, транспортировка его по объему жидкой фазы и адсорбция на поверхности хлопьев активного ила, которые считаются условно твердой фазой. Далее происходит биологическое окисление органических загрязнений микроорганизмами активного ила. Аэрированная и частично окисленная смесь сточной воды, пузырьков воздуха и активного ила через выпускной трубопровод 7 направляется либо на рециркуляцию (повторную обработку), либо во вторичный отстойник.

Схема биологической очистки сточных вод с применением АОРТ представлена на рис. 3. Биологическая очистка сточных вод по вышеуказанной схеме осуществляется следующим образом. Сточная вода после механической очистки поступает в аэротенк 1.



Сюда же подается активный ил из сборника 4. По мере заполнения аэротенка смесью сточной воды и активного ила включаются один или несколько аэраторов-окислителей в зависимости от их производительности и объема аэротенка. Аппараты определенное время работают в режиме рециркуляции, перемешивая смесь, насыщая ее кислородом воздуха,

Рис. 3. Схема биологической очистки сточных вод с применением АОРТ.

1 — аэротенк, 2 — отстойник,
3 — аэрактор-окислитель роторного типа,
4 — сборник, 5 — реактор,
6 — уплотнитель ила, 7 — иловая площадка.

осуществляя процесс массопереноса последнего к клеткам микроорганизмов активного ила и частично окисляя органические загрязнения. Далее обработанная таким образом смесь подается в отстойник 2, где происходит окончательное окисление органических веществ до углекислого газа и воды. Реакцию потребления органических веществ организмами активного ила в присутствии кислорода можно описать уравнением $C_xH_yO_z + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \Delta W$, где $C_xH_yO_z$ — все органические вещества сточных вод. После завершения процесса окисления в отстойнике 2 хлопья активного ила выпадают в осадок. Осажденный активный ил частично идет на рециркуляцию в аэротенк 1, а частично — на утилизацию. Перед подачей в аэротенк 1 возвратный активный ил проходит стадию реаэрации (5), в которой также используется аэратор-окислитель роторного типа. Таким образом, после реаэратора активный ил, хорошо перемешанный и насыщенный кислородом воздуха, поступает в аэротенк 1. Важнейшим конструктивным элементом аэротенка является система аэрации. Ее задача состоит в насыщении очищаемой воды кислородом, поддержании активного ила во взвешенном состоянии и обеспечении постоянного перемешивания сточной воды с илом.

Эффективность очистки сточных вод от загрязнений в значительной степени зависит от организации гидравлических и массообменных процессов в аэрационном сооружении (аэротенке), являющимся основным функциональным звеном технологической схемы аэробной биологической очистки. Основными факторами, влияющими на выбор оптимального режима работы аэротенка, являются гидродинамическая схема течения потоков и эффективность процесса насыщения жидкой среды кислородом воздуха, подаваемого системой аэрации. Правильный выбор системы аэрации является одним из путей достижения высоких показателей аэробной биологической очистки.

До настоящего времени недостаточно изучен механизм совместного растворения и потребления кислорода, а также его распределение по объему аэротенка. Для насыщения сточной воды кислородом проводят процесс аэрации, разбивая воздушный поток на пузырьки, которые по возможности равномерно распределяются в сточной воде. Из пузырьков воздуха кислород абсорбируется водой, а затем переносится к микроорганизмам (см. рис. 4). Таким образом, в ходе очистки протекают два процесса — абсорбция кислорода сточной водой и потребление его микроорганизмами.

Количество абсорбированного кислорода может быть вычислено по уравнению массоотдачи

$$M = \beta_V \cdot V \cdot (C_p - C), \quad (1)$$

где M — скорость массопереноса кислорода, мг/(м³·ч.), β_V — объемный коэффициент массоотдачи, час⁻¹, V — объем сточной воды, м³; C_p , C — равновесная концентрация кислорода и концентрация кислорода в основной массе жидкости, мг/м³. Исходя из уравнения массоотдачи, количество абсорбированного кислорода может быть увеличено за счет роста коэффициента массоотдачи или движущей силы. Наиболее надежный путь — увеличение объемного коэффициента массоотдачи. Известно, что этот коэффициент представляет собой произведение действительного коэффициента массоотдачи $\beta_{ж}$ на удельную поверхность контакта фаз a : $\beta_V = \beta_{ж} \cdot a$. Увеличивая интенсивность дробления

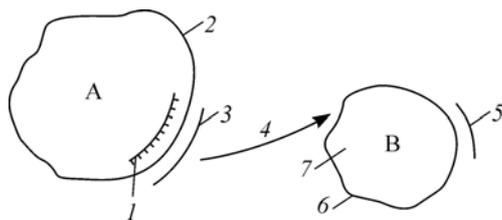


Рис. 4. Схема переноса кислорода от пузырьков газа к микроорганизмам.

А — пузырек воздуха, В — скопление микроорганизмов; 1 — граничный диффузный слой со стороны газа, 2 — поверхность раздела, 3 — граничный диффузный слой со стороны жидкости, 4 — перенос кислорода от пузырька к микроорганизмам, 5 — граничный диффузный слой со стороны жидкости к микроорганизмам, 6 — перенос кислорода внутрь клеток, 7 — реакция между молекулами кислорода и ферментами.

газового потока, то есть уменьшая размеры газовых пузырьков и увеличивая газосодержание потока сточной воды в сооружении, можно значительно увеличить удельную поверхность контакта фаз и тем самым повысить поступление кислорода в сточную воду.

Сотрудниками Института технической теплофизики НАН Украины разработана методика определения объемного коэффициента массопередачи кислорода из газовой фазы в жидкую в ходе биологической очистки сточных вод. Эта методика основана на том, что скорость потребления кислорода микроорганизмами не может превышать скорость его абсорбции, в противном случае ухудшается обмен веществ микробной клетки и снижается скорость окисления загрязнений. Для расчета объемного коэффициента массопередачи было принято допущение, что скорость массопереноса кислорода в диффузионной области равна скорости его потребления в кинетической области. Скорость потребления кислорода — это скорость протекания биологической реакции или удельная скорость биологического окисления, которая представляет собой величину полного биохимического потребления кислорода (БПК_{полн}), т.е. разницу между поступающей и выходящей БПК сточной воды, отнесенной к массе ила и длительности аэрации.

Удельная скорость биологического окисления определяется формулой

$$\rho = \frac{L_{\text{en}} - L_{\text{ex}}}{a_i(1-s)t_{\text{at}}}, \quad (2)$$

где L_{en} — БПК_{полн} сточной воды, подаваемой в аэротенк, мг/л; L_{ex} — БПК_{полн} сточной воды на выходе из аэротенка, мг/л; a_i — доза активного ила, г/л; s — зольность активного ила, t_{at} — период аэрации, час.

Скорость растворения кислорода — это скорость массопереноса его в диффузионной области, которая описывается уравнением (1). Таким образом, исходя из вышеуказанных допущений о том, что в установившемся режиме скорость растворения кислорода равна скорости его потребления, получим равенство уравнений (1) и (2):

$$M = \beta_V \cdot V \cdot (C_p - C) = \frac{L_{\text{en}} - L_{\text{ex}}}{a_i(1-s)t_{\text{at}}}. \quad (3)$$

Расчет объемного коэффициента массопередачи проводим по формуле

$$\beta_V = \frac{L_{\text{en}} - L_{\text{ex}}}{a_i(1-s)t_{\text{at}} \cdot V \cdot (C_p - C)}. \quad (4)$$

Увеличения объемного коэффициента массопередачи можно добиться, повышая удельную поверхность контакта фаз, т.е. увеличивая интенсивность дробления газового потока и газосодержание в сточной воде. На практике, при очистке сточных вод с применением установки, это достигается путем изменения действия механизмов ДИВЭ и конструктивных особенностей роторно-пульсационного аппарата на обрабатываемую среду. Под терминами «механизмы ДИВЭ» и «конструктивные особенности аэрационно-окислительной установки роторного типа» подразумевается возможность изменения амплитуды пульсаций давления, частоты пульсаций потока, скорости сдвига потока при прохождении жидкости через аппарат. Описанные изменения могут проходить за счет варьирования скорости вращения роторного узла, величины зазоров между статором и ротором и количества щелевых отверстий в них, количества циклов обработки.

На первом этапе исследований была изучена зависимость влияния частоты пульсаций потока на абсорбцию кислорода в питьевой воде (табл. 1) при варьировании частоты пульсаций потока от 2,0 до 3,2 кГц и количестве циклов обработки от 1 до 3. Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективна абсорбция кислорода

Таблица 1
Влияние частоты пульсаций потока на абсорбцию кислорода
в питьевой воде

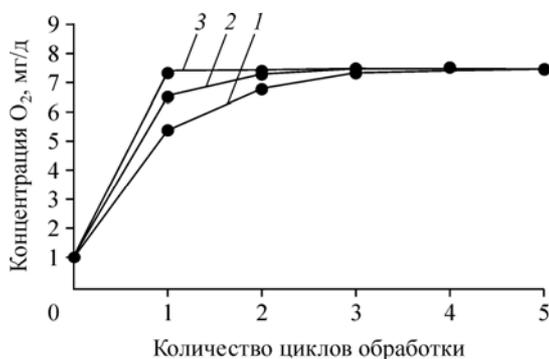
Частота пульсаций, кГц	Концентрация O ₂ , мг/л		
	Один цикл обработки	Два цикла обработки	Три цикла обработки
2,0	7,2	7,9	8,0
2,4	7,5	8,0	8,0
2,8	7,9	8,0	8,0
3,2	7,9	8,0	8,0

в установке АОРТ за 1 цикл при частоте пульсаций 2,8 кГц. При таких условиях обработки содержание растворенного кислорода в воде достигает величины 7,9 мг/л.

Дальнейшие исследования по влиянию механизмов ДИВЭ и конструктивных особенностей аппарата на абсорбцию кислорода проводились на сточной воде жилищно-коммунального хозяйства. Вода заливалась в приемный бункер (миниэротенк) экспериментальной установки АОРТ объемом 60 л и обрабатывалась в режиме рециркуляции за 1–5 циклов. Цикл обработки указанного объема составлял 40 с. Определение концентрации растворенного кислорода осуществлялось методом переменного дефицита кислорода, при котором первоначально анализируемая среда дегазируется, а затем аэрируется с заранее определенным расходом воздуха. Через некоторые промежутки времени брались пробы на анализ концентрации растворенного кислорода. Определение концентрации растворенного кислорода проводилась с помощью оксиметра EZODO PDO-408 при постоянной температуре (26 °С) и атмосферном давлении.

На первом этапе исследований изучалась зависимость концентрации растворенного в воде кислорода от количества циклов обработки при угловой скорости РУ от 38,2 до 52,52 об/мин (рис. 5). Было установлено, что с увеличением скорости вращения РУ в указанном диапазоне количество циклов до насыщения воды кислородом (7,74 мг/л) снижается в три раза. Для достижения максимальной концентрации при обработке среды со скоростью вращения РУ 52,52 об/с необходим один цикл, то есть один проход среды через аппарат, а со скоростью 38,2 об/с — 3 цикла. Таким образом, можно сделать вывод о том, что с увеличением угловой скорости вращения РУ от 38,2 до 52,52 об/с достичь максимальной для данной температуры концентрации растворенного в воде кислорода 26 °С можно за меньшее количество циклов, то есть с меньшей продолжительностью обработки.

При реализации метода ДИВЭ в аэраторе-окислителе одним из основных показателей, влияющих на массоперенос, является частота пульсаций потока, представляющая собой произведение угловой скорости вращения РУ на количество прорезей. Исходя из этого, в дальнейших исследованиях была изучена зависимость концентрации растворенного в среде кислорода от частоты пульсаций потока. При проведении эксперимента частота пульсаций изменялась от 2,0 до 2,8 кГц. Результаты исследований представлены



на рис. 6. Видно, что увеличение частоты пульсаций потока среды в АОРТ позволяет интенсифицировать процесс растворения кислорода. Равновесная

Рис. 5. Зависимость концентрации растворенного кислорода от количества циклов обработки при угловой скорости вращения РУ. 38,2 (1), 47,75 (2), 52,52 (3) об/с; количество прорезей — 60, межцилиндровый зазор — 150 мкм.

Рис. 6. Зависимость концентрации растворенного кислорода от количества циклов обработки при различных частотах пульсаций.
2,0 (1), 2,4 (2), 2,8 (3) кГц;
 $n = 47,75$ об/с, зазор — 150 мкм.

концентрация кислорода при обработке среды с частотой пульсаций 2,8 кГц достигается за 2 цикла, при 2,4 кГц — за 3 цикла, при 2,0 кГц — за 5 циклов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение частоты пульсаций среды позволяет создать развитую поверхность контакта между газовой и жидкой фазами, что благотворно влияет на массоперенос кислорода, позволяя сократить продолжительность его растворения.

Взаимосвязь между скоростью потока среды в радиальном направлении РПА и зазором между статором и роторами объединяет величина скорости сдвига потока, учитывающая радиус ротора и толщину межцилиндрового зазора. По мнению авторов, она также может влиять на процесс растворения кислорода. На рис. 7 показана зависимость концентрации растворенного в среде кислорода от скорости сдвига потока при угловой скорости 47,75 об/с. Результаты исследований подтверждают, что изменение скорости сдвига потока от $57 \cdot 10^3$ до $114 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ позволяет сократить количество циклов обработки среды для достижения равновесной концентрации с семи до двух. Увеличение скорости сдвига потока более $114 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ технически представляется довольно сложным, так как связано с увеличением угловых скоростей и уменьшением зазора между статором и роторами до величин менее 100 мкм.

Теплофизические и энергетические показатели работы аэрационных устройств имеют большое значение при очистке сточных вод. Зависимость этих показателей от частоты пульсаций потока при обработке воды в АОПТ представлена в табл. 2. В частности, были выбраны такие показатели, как объемный коэффициент массопередачи кислорода $K_V, \text{ ч}^{-1}$, окислительная способность, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, эффективность аэрации по производству растворенного в жидкости кислорода, $\text{кгO}_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Из табл. 2 следует, что наибольшая эффективность достигается при проведении обработки среды при частоте пульсаций 2,8 кГц. При этом определяемые показатели достигают максимальной величины.

В табл. 3 приведена сравнительная оценка тепломассобменных и энергетических показателей современных аэрационных устройств, применяемых для очистки сточных вод с установкой АОПТ. К ним относятся: аэраторы фирм Rehau (ФРГ) и Fortegs (Чехия), перфорированные, сетчатые и тканевые аэраторы [11]. Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что разработанная в ИТТФ НАН Украины аэрационно-окислительная установка

роторного типа по представленным тепломассобменным и энергетическим показателям превосходит существующие установки на величину от 20 % (Rehau) до десятков раз (тканевый, сетчатый).

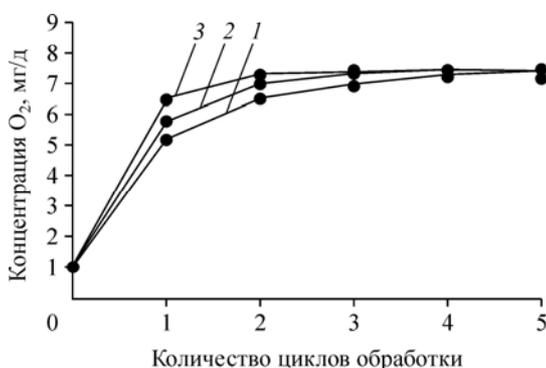


Рис. 7. Зависимость концентрации растворенного кислорода от количества циклов обработки при различных скоростях сдвига потока.

$57 \cdot 10^3$ (1), $85,5 \cdot 10^3$ (2), $114 \cdot 10^3$ (3) с^{-1} ;
 $n = 47,75$ об/с, количество прорезей — 60.

Таблица 2

Зависимость теплофизических и энергетических показателей работы аэрационно-окислительной установки роторного типа от частоты пульсаций потока

Частота пульсаций, кГц	$K_V, \text{ч}^{-1}$	Окислительная способность, кг/ч·м ³	Эффективность аэрации, кг O ₂ /(кВт·ч)
2,0	37,70	4,92	10,9
2,4	40,57	5,71	12,0
2,8	42,00	6,57	13,5
3,2	42,20	6,68	12,7

Таблица 3

Теплофизические и энергетические параметры различных видов аэраторов

Тип аэратора	$K_V, \text{ч}^{-1}$	Окислительная способность, кг/ч·м ³	Эффективность аэрации, кг O ₂ /(кВт·ч)
Rehau	34,44	5,67	10,64
Перфорированный	4,61	0,31	0,61
Сетчатый	4,24	0,23	0,43
Fortegs	15,41	1,31	2,45
Тканевый	3,37	0,01	0,02
АОРТ	42,00	6,57	13,5

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что, используя дискретно-импульсный ввод энергии, управляя его механизмами и изменяя конструктивные особенности РПУ аэратора-окислителя, можно успешно воздействовать на абсорбцию кислорода в сточных водах. Также показано, что за 1–2 прохода обрабатываемой смеси через аппарат достигается максимальная концентрация растворенного кислорода. Следовательно, перекачивая весь объем аэротенка через аппарат, можно максимально насытить кислородом обескислороженную микроорганизмами активного ила сточную воду. Применение АОРТ для очистки сточных вод позволит интенсифицировать массоперенос на границе раздела фаз газ–жидкость и сделать постоянно бездефицитным содержание растворенного кислорода в обрабатываемой среде, что является одним из важнейших факторов интенсификации процесса биологической очистки сточных вод. Кроме того, энергозатраты на аэрацию составляют, как минимум, на 20 % меньше, чем у передовых зарубежных аналогов.

Список литературы

1. Долинский А.А. Принцип дискретно-импульсного введения энергии та його використання в технологічних процесах // Вісник АН УРСР. 1984. № 1. С. 39–46.
2. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька // Промышленная теплотехника. 1995. Т. 17, № 5. С. 3–28.
3. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. II. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков // Промышленная теплотехника. 1996. Т. 18, № 1. С. 3–20.
4. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энерго- ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19, № 4–5. С. 13–25.
5. Долинский А.А., Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологиях. Киев: ИТТФ НАНУ, 1996. 208 с.
6. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. Киев: Наукова думка, 2008. 381 с.
7. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инж.-физ. журн. 1996. Т. 69, № 6. С. 35–43.
8. Басок Б.И., Гартвиг А.П., Коба А.Р. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред // Промышленная теплотехника. 1996. № 1. С. 50–56.
9. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов // Инж.-физ. журн. 2002. Т. 75, № 2. С. 58–68.
10. Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация. Харьков: Вірованець А.П. «Апостроф», 2012. 184 с.
11. Серпокрылов Н.С., Смоляниченко А.С. Снижение энергопотребления систем аэрации сточных вод // Вестник ТГАСУ. 2010. № 3. С. 192–199.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2018 г.,
после доработки — 26 марта 2018 г.