

УДК 628.356

В. И. НЕЗДОЙМИНОВ, Д. В. ЗАВОРОТНЫЙ, О. В. ГОДОВИЧЕНКО
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ЛИНИИ ТОКА АЭРОТЕНКА-ОСВЕТИТЕЛЯ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

Аннотация. Представлены схематические линии тока в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации. Приведены теоретические зависимости для расчёта границы водоворотной зоны. Экспериментально определены положения характерных линий тока водоворотной зоны. Определён угол наклона внешней границы затопленной струи в аэротенке-осветлителе.

Ключевые слова: аэротенк-осветлитель, эрлифтный биореактор, водоворотная зона, турбулентная струя, линии тока.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время на канализационных очистных станциях достаточно широко используются аэротенки-осветлители. Аэротенк-осветлитель представляет собой аэротенк и осветлитель, скомбинированные в одном сооружении. Соответственно, в аэротенке-осветлителе осуществляется аэробная биохимическая обработка сточных вод активным илом и отделение частиц активного ила от очищаемой жидкости. Отделение активного ила в аэротенках-осветлителях, используемых в системах очистки хозяйственно-бытовых стоков, производится преимущественно во взвешенном слое ила [1, 2].

Время пребывания активного ила во взвешенном слое ограничено, поскольку при длительном отсутствии аэрации микроорганизмы, составляющие активный ил, подвергаются нежелательным физиологическим изменениям. Время нахождения ила во взвешенном слое осветлителя ограничивают посредством возврата в аэрируемую часть аэротенка-осветлителя. В существующих аэротенках-осветлителях рециркуляция ила из осветлителя производится либо принудительно – дополнительным насосным оборудованием, либо за счёт использования кинетической энергии потоков, которые возникают в аэротенках со свободно плавающим илом за счёт аэрации [3]. Принудительная насосная рециркуляция, как правило, осуществляется эрлифтами [4]. Недостатком принудительной рециркуляции являются дополнительные экономические затраты. Эрлифтные системы рециркуляции обладают значительной материалоемкостью. Эксплуатация эрлифтных систем рециркуляции на существующих канализационных очистных станциях малой производительности часто сопровождается перерасходом воздуха [4]. Недостатком использования для рециркуляции ила потоков, образующихся при работе системы аэрации, является сложность обеспечения требуемого расхода иловой смеси, перекачиваемой из осветлителя в аэротенк. В таких аэротенках-осветлителях требуется детальное исследование зависимости рециркуляции иловой смеси от расхода воздуха.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

К аэротенкам-осветлителям, в которых возврат иловой смеси из осветлителя в аэротенк производится без использования дополнительного насосного оборудования, относится разработанный в Дон-НАСА аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации [3, 5]. Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации представляет собой эрлифтный биореактор с внутренней циркуляцией [6, 7], который заблокирован с осветлителем (рис. 1).

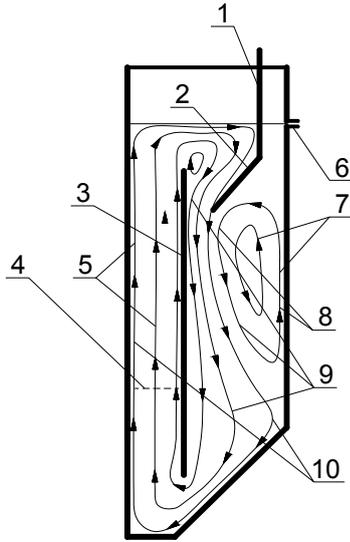


Рисунок 1 – Схема аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации: 1 – вертикальная разделительная перегородка; 2 – наклонный козырёк; 3 – вертикальная стенка затопленного эрлифта; 4 – аэратор; 5 – восходящий газожидкостный поток; 6 – отводящий лоток; 7 – восходящий поток водоворотной зоны; 8 – водоворотная зона; 9 – нисходящий поток; 10 – основной циркуляционный поток.

странстве учитывает случаи обтекания препятствия, разворота струи и т. д. [10]. При этом рассматриваемые струи не ограничиваются по длине.

ЦЕЛЬ

Определение угла наклона границы затопленной турбулентной струи, который необходим для расчёта геометрических и кинематических параметров водоворотной зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На рисунке 2 представлено условное положение линий тока водоворотной зоны (при отсутствии гидравлической нагрузки на осветлитель), основанное на теории затопленных турбулентных струй [10]. Характерной линией тока является граница водоворотной зоны 10. На любой глубине s относительно уровня нижней кромки наклонного козырька в пределах водоворотной зоны восходящий и нисходящий расходы равны. То есть расход за пределами струи равен результирующему расходу той части расхода струи, которая протекает на расстоянии от y_m до b от внутренней границы пограничного слоя струи. Математически это условие выражается зависимостью 1.

$$\int_{y_m}^b (y_{вн} \cdot L \cdot u_{вн}) dy_{вн} = Q_w, \quad (1)$$

где Q_w – расход между внешней границей струи и наружной стенкой аэротенка-осветлителя, $\text{м}^3/\text{с}$, который можно вычислить по формуле 3;
 y_m – горизонтальное расстояние от внутренней границы пограничного слоя струи до границы водоворотной зоны, м;

Затопленный эрлифт является таким воздушным подъёмником, у которого верхний срез расположен ниже уровня поверхности жидкости. Затопленный эрлифт состоит из аэратора 4, который отделён вертикальной, не достигающей до дна, стенкой 3. В результате газлифтного эффекта над аэраторами возникает ограниченный стенками эрлифта восходящий газожидкостный поток 5, который за пределами затопленного эрлифта преобразуется в нисходящий поток 9. Иловая смесь, которая перекачивается затопленным эрлифтом, образует основной циркуляционный поток 10. Аэротенк-осветлитель содержит вертикальную разделительную перегородку 1, снабжённую наклонным козырьком 2. Нисходящий поток 9, проходя через зазор между стенкой затопленного эрлифта и наклонным козырьком, подвергается сжатию [3, 5]. Нисходящий поток следует рассматривать как затопленную турбулентную струю, которая образует водоворотную зону 8 за плохо обтекаемым телом – наклонным козырьком [10]. Восходящий поток 7 водоворотной зоны способствует образованию обновляемого взвешенного слоя, в котором происходит осветление жидкости перед поступлением в отводящий лоток 6 [8].

Известны зависимости между производительностью затопленного эрлифта и расходом подаваемого в него воздуха [6, 9]. Зависимости расхода иловой смеси, которая циркулирует в водоворотной зоне, от производительности затопленного эрлифта до настоящего времени отсутствуют. Нами предложено получить эту зависимость исходя из теории турбулентных струй [8, 10].

На начальном участке затопленная струя расширяется линейно, поэтому её геометрические и кинематические параметры зависят от угла наклона внешней границы струи. Теория течения затопленных турбулентных струй в ограниченном про-

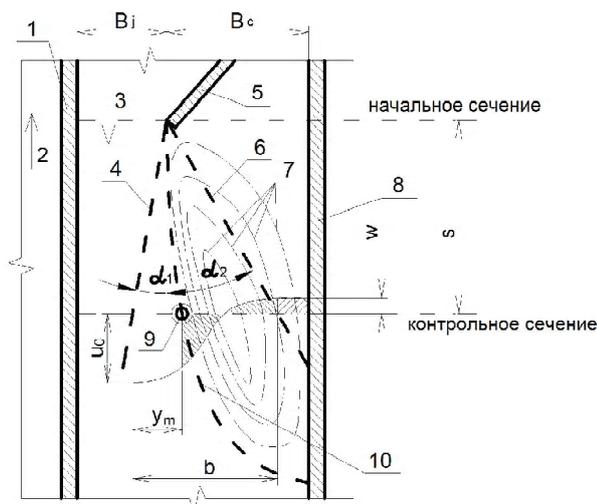


Рисунок 2 – Схематическое положение линий тока водоворотной зоны: 1 – вертикальная стенка затопленного эрлифта; 2 – восходящий газожидкостный поток; 3 – нисходящий поток аэротенка; 4 – внутренняя граница пограничного слоя струи; 5 – наклонный козырёк; 6 – внешняя граница струи; 7 – линии тока водоворотной зоны; 8 – наружная стенка аэротенка-осветлителя; 9 – контрольная точка; 10 – граница водоворотной зоны.

b – ширина пограничного слоя струи, м;

L – длина прямоугольного в плане аэротенка-осветлителя, измеряемая в перпендикулярном по отношению к плоскостям рисунков 1, 2 направлении, м;

$u_{ен}$ – вертикальная составляющая скорости, м/с элементарной струйки, протекающей на расстоянии $y_{м}$ от внутренней границы пограничного слоя струи. По формуле Шлихтинга в пределах начального участка струи:

$$u_{ен} = (u_0 + w) \cdot [1 - (y_{ен}/b)^{1,5}]^2 - w, \quad (2)$$

где u_0 – скорость нисходящего потока 3, м/с;

$$Q_w = (B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot L \cdot w, \quad (3)$$

где B_c – расстояние от нижней кромки наклонного козырька 5 до наружной стенки 8, м;

s – расстояние от начального сечения, м;

α_2 – угол между вертикалью и внешней границей струи 6;

w – средняя скорость восходящего потока за пределами струи, м/с. Формула 4 для расчёта скорости w за пределами струи выведена из условия равенства результирующего расхода во всех поперечных сечениях.

$$w = \frac{u_0 \cdot s \cdot [0,135 - \operatorname{tg}(\alpha_1) - 0,125 \cdot \delta_0 / S_0]}{B_c + s \cdot (0,165 - \operatorname{tg}(\alpha_2))}, \quad (4)$$

где s – расстояние от начального сечения, м;

S_0 – длина начального участка затопленной струи [10], м, вычисляемая из уравнения 5;

$$\frac{0,37 \cdot S_0^{0,8} \cdot \nu^{0,2}}{u_0^{0,2}} + \operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot S_0 = B_j, \quad (5)$$

δ_0 – толщина пристенного слоя струи на расстоянии S_0 от начального сечения:

$$\delta_0 = B_j - S_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1), \quad (6)$$

где ν – кинематическая динамическая вязкость жидкости, м²/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

α_1 – угол между вертикалью и внутренней границей пограничного слоя струи ;
 B_j – ширина струи в начальном сечении, м.

После подстановки в выражение 1 формул 3, 4 и интегрирования получена формула 7, позволяющая вычислить координаты s и y_m границы ядра постоянной массы струи:

$$\begin{aligned} & (0,3 \cdot s - y_m) \cdot (0,45 - 0,55 \frac{s \cdot [0,135 - \operatorname{tg}(\alpha_1) - 0,125 \cdot \delta_0 / S_0]}{B_c + s \cdot (0,165 - \operatorname{tg}(\alpha_2))}) = \\ & = \frac{(B_c - s \cdot \operatorname{tg} \alpha_2) \cdot [0,135 - \operatorname{tg}(\alpha_1) - 0,125 \cdot \delta_0 / S_0]}{B_c + s \cdot (0,165 - \operatorname{tg}(\alpha_2))} \end{aligned} \quad (7)$$

При истечении турбулентной струи во встречный поток [10]:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = (0,416 - 0,134 \cdot w/u_0) \cdot c; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = (0,584 + 0,134 \cdot w/u_0) \cdot c. \quad (9)$$

где c – константа турбулентности. При образовании водоворотной зоны за плохо обтекаемым телом и неограниченной длине струи принимается равной 0,3 [10].

Если принять значение константы турбулентности $c = 0,3$, то при значительном превышении нисходящей скорости u_0 над восходящей скоростью w тангенсы углов α_1 и α_2 составят: $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,125$, $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$.

Проследить положение линий тока можно при помощи помещения в прозрачную жидкость непрозрачных веществ (жидкого красителя, твёрдых частиц). При закреплении в потоке жидкости нити, обладающей нейтральной плавучестью, её положение приблизится к положению условной линии

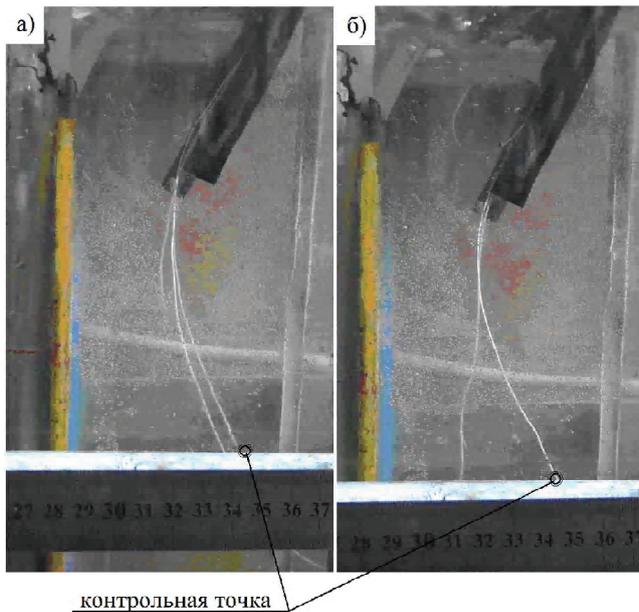


Рисунок 3 – Визуализация границы водоворотной зоны посредством нитей: а) все нити стремятся к границе водоворотной зоны; б) наиболее длинная нить пересекает контрольную точку, остальные – временно отклоняются из-за турбулентных пульсаций.

которые проходят по границе водоворотной зоны, совпали с теоретическими, которые были приняты при константе турбулентности $c = 0,3$.

тока, проходящей через точку закрепления этой нити. На рисунке 3 представлено положение нитей, которые были закреплены на нижней кромке наклонного козырька лабораторной модели аэротенка-осветлителя. Использовались три нити, обладающие различной длиной: 70, 130 и 220 мм. Скорость нисходящего потока составляла $u_0 \approx 50$ м/с. Устанавливались следующие значения геометрических параметров: ширина зазора между нижней кромкой наклонного козырька и вертикальной стенкой затопленного эрлифта $B_j = 50$ мм; расстояние от нижней кромки наклонного козырька до наружной стенки $B_c = 75$ мм; высота от дна до нижней кромки наклонного козырька $h_w = 260$ мм. Глубина контрольного сечения составляет $s = 0,1$ м.

В ходе анализа фото- и видеоматериалов, полученных в ходе эксперимента, выявилось, что в крайнем и наиболее часто принимаемом положении нити пересекают линию с координатами $s = 100$ мм, $y_m \approx 29$ мм. На рисунке 3 данная линия отмечена как «контрольная точка». Если принять $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$, то для глубины контрольного сечения $s = 0,1$ м тождество 7 выполняется при $y_m = 0,029$ м. Экспериментальные координаты линий тока,

ВЫВОДЫ

1. Выведено уравнение 7 для вычисления координат границы водоворотной зоны.
2. Определён угол наклона границы затопленной турбулентной струи в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации. Тангенс угла наклона границы струи составляет $\text{tg}(\alpha_2) = 0,175$.
3. Установлено, что ограничение длины затопленной турбулентной струи поперечным препятствием не оказывает значительного влияния на раскрытие струи и форму образующейся водоворотной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басамыкина, А. Н. НДТ очистки хозяйственно-бытовых сточных вод: оценка эффективности работы очистных сооружений «Биокомпакт» для обеспечения безопасного сброса в р. Истру (Московская область) [Электронный ресурс] / А. Н. Басамыкина // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2016. – № 6(27). – С. 107–111. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=27440453>.
2. Гогина, Е. С. Устройство, особенности строительства и эксплуатации индивидуальных очистных сооружений в РФ [Электронный ресурс] / Е. С. Гогина, В. П. Саломеев, Ю. П. Побегайло, Н. А. Макиша // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2014. – № 10(93). – С. 142–147. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=22482316>.
3. Заворотный, Д. В. Обеспечение циркуляции иловой смеси в аэротенках-отстойниках со взвешенным слоем [Электронный ресурс] / Д. В. Заворотный, А. В. Жибоедов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – Вып. №3(119) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – С. 186–189. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2016_3_38.
4. Дзюбо, В. В. Модернизация эрлифтного узла рециркуляции активного ила [Электронный ресурс] / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова // Водоочистка. – 2014. – № 10. – С. 29–33. – Режим доступа : https://updoc.site/download/5acfc51f6dda_e.pdf.
5. Нездойминов, В. И. Процессы осветления иловой смеси во взвешенном слое в сооружениях с эрлифтной системой аэрации [Текст] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2017»: материалы X – юбилейной междунауч. практич. конф. – Новочеркасск : Лик, 2017. – С. 268–272.
6. Al-Mashhadani, M. K. H. Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes [Electronic resource] / M. K. H. Al-Mashhadani, S. J. Wilkinson, W. B. Zimmerman // Chemical Engineering Science – 2015. – Vol. 137. – pp. 243–253. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250915004406>.
7. Cozma, P. Airlift reactors: Applications in wastewater treatment [Electronic resource] / P. Cozma, M. Gavriescu // Environmental Engineering and Management Journal. – 2012. – Vol. 11, № 8. – PP. 1505–1515. – Access mode : <https://www.researchgate.net/publication/287447561>.
8. Заворотный, Д. В. Применение теории турбулентных струй для расчета процесса обновления взвешенного слоя ила в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации [Текст] / Д. В. Заворотный, В. И. Нездойминов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник докладов XI Международной науч. аспирантов и студентов. – Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федер. ун-та, 2017. – С. 14–16.
9. Нездойминов, В. И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации [Текст] / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – № 93. – С. 353–358.
10. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй [Текст] / Г. Н. Абрамович. – М. : Физматгиз, 1960. – 715 с.

Получено 30.09.2018

В. І. НЕЗДОЙМІНОВ, Д. В. ЗАВОРОТНИЙ, О. В. ГОДОВІЧЕНКО
ЛІНІЇ ТЕЧІЇ АЕРОТЕНКА-ОСВІТЛЮВАЧА З ЗАТОПЛЕНОЮ ЕРЛІФТНОЮ
СИСТЕМОЮ АЕРАЦІЇ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Представлені схематичні лінії течії в аэротенку-освітлювачі з затопленою ерліфтною системою аерації. Наведені теоретичні залежності для розрахунку межі водовертної зони. Експериментально визначені положення характерних ліній течії водовертної зони. Визначено кут нахилу зовнішньої межі затопленого струменя в аэротенку-освітлювачі.

Ключові слова: аэротенк-освітлювач, ерліфтний біореактор, водовертна зона, турбулентний струмінь, лінії течії.

VIKTOR NEZDOYMINOV, DMITRII ZAVOROTNYI, OKSANA GODOVICHENKO
STREAMLINES OF THE AERATOR-CLARIFIER UNIT WITH FLOODED
AERATION SYSTEM

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The schematic streamlines in the aerator-clarifier unit with flooded airlift aeration system have been presented. The theoretical dependences for the coordinates of the eddy zone boundary calculating have been given. The characteristic streamlines of the eddy zone have been determined experimentally. The angle of inclination of the outer boundary of the submerged jet in the aerator-clarifier unit has been determined.

Key words: aerator-clarifier unit, airlift bioreactor, eddy zone, turbulent jet, streamlines.

Нездойминов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: биологическая очистка сточных вод.

Заворотный Дмитрий Викторович – аспирант кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: водоотведение, механика жидкости и газа.

Годовиченко Оксана Викторовна – магистрант кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: водоотведение, механика жидкости и газа.

Нездойминов Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічна очистка стічних вод.

Заворотний Дмитро Вікторович – аспірант кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: водовідведення, механіка рідини та газу.

Годовіченко Оксана Вікторівна – магістрантка кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: водовідведення, механіка рідини та газу.

Nezdoyminov Viktor – D. Sc. (Eng.), Professor, Head of Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological treatment of wastewater.

Zavorotnyi Dmitrii – post-graduate student, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: sewerage, mechanics of fluids.

Godovichenko Oksana – Master's student, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: sewerage, mechanics of fluids.