

УДК 628.35

**В. И. НЕЗДОЙМИНОВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ АЭРОТЕНКА С ЗАТОПЛЕННОЙ  
ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ**

Предложены основные расчетные зависимости аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации для очистки городских сточных вод от органических загрязнений и минерального азота.

**эрлифт, окислительная мощность, окислительная способность, концентрация кислорода**

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Повышение эффективности очистки городских и большинства промышленных сточных вод от органических загрязнений и соединений азота непосредственно связано с повышением интенсивности массообменных процессов в биологическом реакторе с активным илом и совершенствование системы аэрации.

**АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В большинстве случаев для очистки сточных вод используются аэротенки различной конструкции с отдельно расположенными вторичными отстойниками, глубина которых не превышает 5 м. Поэтому в аэрационном сооружении такого типа сложно достигать высокой степени использования кислорода воздуха и повышенной интенсивности массообмена.

Современные исследования в области биологической очистки сточных вод показали, что наиболее эффективными признаны эрлифтные реакторы (ALR) [1, 2] с большой глубиной заложения при малом поперечном сечении. Первые эрлифтные реакторы были запатентованы во Франции в 1955 году [3]. С этого времени опубликовано достаточно большое количество публикаций на эту тему, но крупномасштабных исследований эрлифтных реакторов в промышленных условиях не проводилось. Практически все исследования [2, 4–6] проводились в лабораторных условиях со свободноплавающими и прикрепленными микроорганизмами [7].

По эффективности аэрации эрлифтные реакторы относятся к пневматическим системам аэрации. Степень использования кислорода воздуха достигает 15 %. В эрлифтах ALR имеются зоны или каналы, по которым движется жидкость по замкнутому контуру. Зоны отделены перегородкой, которая образует зазоры у дна и у поверхности. В одну из зон подается воздух для создания газлифтного эффекта, обеспечивающий движение жидкости по замкнутому контуру. Наличие перегородок в эрлифтных биологических реакторах позволяет эффективно перемешивать жидкость с активным илом в сооружении и обеспечивать создание зон с низкой концентрацией кислорода. Биохимическая способность активного ила к окислению органических веществ и азота аммонийных соединений не ухудшается. Эрлифтные реакторы обычно делятся на два типа в зависимости от структуры потока [9].

Реакторы IL-ALR с внутренней циркуляцией представляют собой емкость с перегородками, служащими для отделения восходящего потока от нисходящего. Реакторы EL-ALR с внешней циркуляцией отличаются наличием дополнительных горизонтальных трубопроводов или широких перегородок, которые влияют на формирование гидродинамической структуры потоков. У этих типов реакторов отсутствует верхняя зона интенсивного перемешивания. Эрлифтный реактор с внутренней циркуляцией считается более эффективным с точки зрения протекания массообменных процессов диффузионного растворения кислорода.

Разновидностью эрлифтного реактора с внутренней циркуляцией считается эрлифт с затопленной системой аэрации, разработанный в ДонНАСА [10]. Несомненными преимуществами эрлифта с затопленной системой аэрации являются высокая степень растворения кислорода, отсутствие вращающихся деталей, простота, надежность и долговечность конструкции. В эрлифтных биореакторах для аэрирования и циркуляции применяется система пневматической аэрации с глубиной аэрирования жидкости 5 м. В эрлифтных реакторах создаются благоприятные условия для одновременного культивирования аэробных гетеротрофных микроорганизмов, нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов.

Для широкого внедрения эрлифтных биореакторов в практику очистки сточных вод необходимы расчетные зависимости окислительной способности аэрационной системы и окислительной мощности аэробного активного ила с учетом площади аэротенка и затопленного эрлифта.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ

Концентрация кислорода в биологическом реакторе с затопленным эрлифтом определяется, с одной стороны, окислительной способностью системы аэрации (ОС), а с другой – окислительной мощностью (ОМ) активного ила. В случае, если скорость потребления кислорода микроорганизмами активного ила меньше скорости растворения  $ОМ > ОС$ , концентрация кислорода в сооружении будет снижаться. И, наоборот, при условии  $ОМ < ОС$  концентрация кислорода будет возрастать, достигая некоторого максимального значения. При близких значениях ОМ и ОС в биореакторе с затопленной эрлифтной системой аэрации образуются в верхней части аэробные зоны, а в нижней анаэробные зоны. Падение кислорода по глубине сооружения определяется скоростью его потребления гетеротрофными аэробными микроорганизмами и нитрифицирующими в объеме нисходящего потока. В свою очередь, при фиксированной глубине сооружения объем зон нисходящего потока связан с площадью этого потока.

Отношение площади затопленного эрлифта и биореактора  $\omega_{Эрл} / \omega_{Аэр}$  находится из условия  $ОС = ОМ$ . Окислительная способность аэрационной системы равна:

$$ОС = Q_{Г} \cdot M \cdot k_{исп}, \text{ кгO}_2/\text{ч}, \quad (1)$$

где  $k_{исп}$  – коэффициент использования кислорода воздуха;  
 $M$  – массовая доля кислорода в объеме подаваемого воздуха, г/м<sup>3</sup>;  
 $Q_{Г}$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч.

Выразим расход воздуха через интенсивность аэрации и площадь эрлифта:

$$Q_{Г} = I_{Эрл} \cdot \omega_{Эрл}, \text{ получим } ОС = I_{Эрл} \cdot \omega_{Эрл} \cdot M \cdot k_{исп}.$$

Окислительная мощность активного ила:

$$ОМ = \rho \cdot a \cdot W, \text{ кгO}_2/\text{ч}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельная скорость окисления субстрата, гO<sub>2</sub>/кг<sub>ила</sub>·ч;  
 $a$  – концентрация активного ила кг/м<sup>3</sup>;  
 $W$  – объем аэротенка, м<sup>3</sup>.

Объем аэротенка выразим через его площадь  $\omega_{Аэр}$  и глубину  $h_{Аэр}$ :

Уравнение (2) примет вид:  $ОМ = \rho \cdot a \cdot \omega_{Аэр} \cdot h_{Аэр}$ .

Приравняв уравнения (1) и (2), получим зависимость:

$$\frac{\omega_{Эрл}}{\omega_{Аэр}} = \frac{\rho \cdot a \cdot h_{Аэр}}{M \cdot k \cdot I_{Эрл}}. \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что при зафиксированных значениях  $\omega_{Эрл}/\omega_{Аэр}$  и глубины сооружения, уменьшить аэробную зону аэротенка можно путем увеличения концентрации активного ила уменьшением интенсивности аэрации  $I_{Эрл}$ . С технологической точки зрения наиболее предпочтительней регулировать концентрацию кислорода в сооружении следует за счет изменения подачи воздуха в эрлифт.

Концентрация растворенного кислорода  $C_1$  в жидкости, выходящей из затопленного эрлифта, может быть вычислена по формуле:

$$C_1 = \frac{Q_{Г} \cdot M \cdot k_{исп}}{Q_{В}}, \text{ г/м}^3, \quad (4)$$

В нисходящем потоке концентрация кислорода снижается за счет его потребления аэробными микроорганизмами активного ила. Время падения кислорода в нисходящем потоке с концентрации  $C_1$  до некоторой  $C_0$  определяется зависимостью (5):

$$t = \frac{C_1 - C_0}{\rho \cdot a}, \text{ ч} \quad (5)$$

При культивировании в аэротенке только аэробных гетеротрофных микроорганизмов концентрацию  $C_0$ , в соответствии с требованиями СНиП рекомендуется принимать  $2 \text{ мг/дм}^3$ . Совмещение процессов нитрификации и денитрификации в сооружении с эрлифтной системой аэрации требует снижения величины  $C_0$  до  $0,5 \dots 1,0 \text{ мг/дм}^3$  [11].

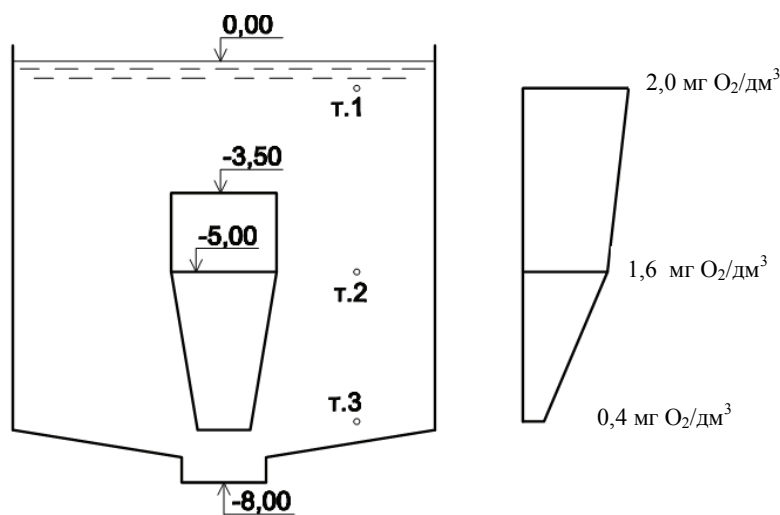
Для подтверждения полученных закономерностей был выполнен комплекс натурных исследований по определению закономерностей распределения кислорода по глубине промышленного аэротенка-отстойника при очистке городских сточных вод с одновременным удалением органических загрязнений и минерального азота.

Измерение растворенного кислорода по глубине аэротенка-отстойника производили при помощи портативного кислородомера АЖА-101МА, предназначенного для проведения анализа непосредственно в аэрационном сооружении.

Измерения проводились при стабильном протекании процесса одновременной нитри-денитрификации в трех характерных точках аэротенка: т. 1 – на глубине  $0,3 \text{ м}$ ; т. 2 – на глубине  $5,0 \text{ м}$ ; т. 3 – на глубине  $7,0 \text{ м}$ . Первая точка расположена в зоне интенсивной аэрации потока, вторая в зоне стабилизации потока и третья в придонной аноксидной зоне.

На рис. 1 показаны значения кислорода в этих точках при подаче сточных вод  $44 \text{ м}^3/\text{ч}$  и расходе воздуха  $Q_r = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствует интенсивности аэрации в эрлифте  $I_{эпл} = 13,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  и подаче эрлифта  $Q_b = 2\,070 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Концентрация активного ила  $a = 2,9 \text{ кг/м}^3$ , зольность ила  $30 \%$ , удельная скорость окисления по БПК  $\rho = 5 \text{ г}/(\text{кг}\cdot\text{ч})$ .

Экспериментальные данные свидетельствуют том, что по глубине аэротенка концентрация кислорода разнится (рис.). В зоне интенсивной аэрации концентрация кислорода в воде максимальна  $O_2 = 2 \text{ мг/дм}^3$ . Небольшое падение кислорода наблюдается между точкой 1 и точкой 2. Зато резкое падение кислорода прослеживается на глубинах больше  $5 \text{ м}$ . В аэротенке на глубине  $7,0 \text{ м}$  концентрация растворенного кислорода снижается до  $0,4 \text{ мг/дм}^3$ , а на входе в эрлифт концентрация кислорода в воде понижается до  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ .



**Рисунок** – Распределение концентраций кислорода по глубине аэротенка при интенсивности аэрации в эрлифте  $16,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ .

Сравним значения кислорода, вычисленные по формулам (4 и 5) с натурным распределением кислорода по глубине аэротенка.

Концентрация кислорода в жидкости, выходящей из затопленного эрлифта:

$$C_1 = \frac{125 \cdot 280 \cdot 0,14}{2\,070} = 2,4 \text{ г/м}^3$$

Время, за которое концентрация кислорода в аэротенке снизится в нисходящем потоке с  $2,4 \text{ г/м}^3$  до  $C_0 = 0,5 \text{ г/м}^3$ :

$$t = \frac{2,4 - 0,5}{6,4 \cdot 4,0 \cdot (1 - 0,3)} = 0,1 \text{ ч или 6 мин.}$$

Вычисленные значения кислорода в характерных точках аэротенка по формулам (4 и 5) практически совпадают с полученными экспериментальными данными.

Параллельно проводились исследования по определению скорости дыхания активного ила в различных точках по глубине опытного аэротенка. Пробы жидкости с активным илом отбирались в верхней части аэротенка (у поверхности)  $V_1$  и на глубине 6 м –  $V_2$ . Скорость дыхания определялась с помощью кислородомера по стандартной методике. Для этого культуральную жидкость помещали в химическую посуду и искусственно при помощи микрокомпрессора доводили концентрацию растворенного кислорода до  $4 \text{ мг/дм}^3$ . После чего определялась кинетика поглощения растворенного кислорода микроорганизмами активного ила и были получены удельные скорости дыхания, которые составили:

$$V_1 = 8 \text{ мг/(г·ч)};$$

$$V_2 = 24 \text{ мг/(г·ч)}.$$

Результаты исследований показали, что активный ил, отобранный из нижней части биореактора, обладает более высокой способностью к потреблению кислорода по сравнению с активным илом у поверхности в зоне аэрации. Это объясняется отсутствием во внутриклеточном веществе микроорганизмов, находящихся в анаэробных условиях, растворенного кислорода. При попадании этих микроорганизмов в аэробные условия происходит не только дыхание, но растворение и проникновение кислорода во внутриклеточную плазму.

## ВЫВОДЫ

1. В аэротенках с затопленной эрлифтной системой аэрации распределение кислорода по глубине сооружения определяется окислительной способностью аэрационной системы и окислительной мощностью аэробных микроорганизмов активного ила.

2. Для определения соотношения площади аэротенка и затопленного эрлифта рекомендуется использовать полученную зависимость 3, а изменение концентраций кислорода по глубине аэротенка – зависимости 4 и 5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of the baffle clearance design on hydrodynamics of a two riser rectangular airlift reactor with inverse internal loop and expanded gas-liquid separator [Текст] / М. Peter, М. Argyrios, М. Bergougou, Tang Yu. Jun // Chemical Engineering Journal. – 2006. – 121. – P. 17–26.
2. Kaustubh, M. Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor [Текст] / М. Kaustubh, D. Dasb, М. Biswasa // Chemical Engineering Science. – 2006. – 61. – P. 4617–4624.
3. Lefrancois, L. Effectionnements aux procedes de cultures forgiques et de Fermetations industrielles. Brevet D'Invention [Текст] / L. Lefrancois, C. Mariller, J. Mejane. – France, No. 1102200. 1955. – P. 102–200.
4. Lo, Cheng-Shing. Local hydrodynamic properties of gas phase in an internal-loop airlift reactor [Текст] / Cheng-Shing Lo, Shyh-Jye Hwang // Chemical Engineering Journal. – 2003. – 91. – P. 3–22.
5. Blažej, M. Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor [Текст] / М. Blažej, М. Kiša, J. Markoš // Chemical Engineering and Processing. – 2004. – 43. – P. 1519–1527.
6. Lin, Tsao-Jen. Studies on hydrodynamics of an internal-loop airlift reactor in gas entrainment regime by particle image analyzer [Текст] / Tsao-Jen Lin, Po-Chou Chen // Chemical Engineering Journal. – 2005. – 108. – P. 69–79.
7. Experiments and simulations of gas-solid flow in an airlift loop reactor [Текст] / Chaoyu Yan, Chunxi Lu, Yiping Fan, Rui Cao, Yansheng Liu // Particuology. – 2011. – 9. – P. 130–138.
8. Blažej, M. Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor [Текст] / Blažej, М. Kiša, J. Markoš // Chemical Engineering and Processing. – 2004. – 43. – P. 1519–1527.
9. Нездойминов, В. И. Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах [Текст] / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах. Науковий вісник будівництва ХДТУБА. – Харків : ХОТВ АБУ, 2008. – № 49. – С. 131–136.
10. Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина. – М. : Стройиздат, 1980. – 200 с.

Получено 30.09.2014

**В. І. НЕЗДОЙМІНОВ**  
**РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ АЕРОТЕНКА ІЗ ЗАТОПЛЕНОЮ**  
**ЕРЛІФТНОЮ СИСТЕМОЮ АЕРАЦІЇ**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Запропоновано основні розрахункові залежності аеротенка із затопленою ерліфтною системою аерації для очистки міських стічних вод від органічних забруднень і мінерального азоту.

**ерліфт, окислювальна потужність, окислювальна здатність, концентрація кисню**

**VIKTOR NEZDOYMINOV**  
**CALCULATED ACCORDING TO THE AERATION TANK WITH AIR LIFT**  
**SUBMERGED AERATION SYSTEM**

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The basic design depending aeration tank with air lift submerged aeration system for municipal wastewater treatment of organic waste and mineral nitrogen has been suggested.

**airlift, oxidizing power, oxidizing ability, concentration of oxy**

**Нездоймінов Віктор Іванович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: біологічна очистка стічних вод.

**Нездойминов Виктор Иванович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: биологическая очистка сточных вод.

**Nezdoyminov Viktor** – PhD, Associate Professor, Head of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological treatment of wastewater.