

УДК 628.356

Заворотный Д. В.

(ДонНАСА, г. Макеевка, ДНР, d.v.zavorotnyi@donnasa.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОТЕНКОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

*Представлены результаты экспериментальных исследований геометрически подобных моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. На основании полученных данных доказано, что определение максимальных допустимых скоростей течения потоков в проектируемом производственном аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации следует выполнять с соблюдением только геометрического подобия.*

**Ключевые слова:** аэротенк-осветлитель, взвешенный слой, гидравлическая нагрузка, подобие, автомоделность, активный ил, аэротенк-отстойник, илоотделение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В биологической очистке городских сточных вод в настоящее время преобладают аэробные методы. Аэробная биологическая очистка подразумевает поддержание жизнедеятельности микроорганизмов (активного ила), которые осуществляют переработку биологически окисляемых веществ, и изъятие этих микроорганизмов из очищенной жидкости. На станциях очистки стоков от небольших населённых мест поддержание жизнедеятельности активного ила и его извлечение зачастую осуществляется в одном скомбинированном биореакторе, что позволяет снизить габариты сооружения и затраты на перекачивание очищаемой жидкости и возвратного ила. Илоотделение в аэротенках-отстойниках и аэротенках-осветлителях преимущественно происходит благодаря фильтрованию восходящего потока иловой смеси сквозь взвешенный слой ила. Для устранения некоторых проблем в эксплуатации аэротенков-отстойников с илоотделением во взвешенном слое был разработан усовершенствованный аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации [1].

Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации (рис. 1) условно состоит из трёх зон: I — аэротенк, II — осветлитель, III — отстойник. В аэротенке

осуществляется биологическая очистка активным илом, аэрация которого обеспечивается при помощи затопленного эрлифта. Затопленный эрлифт состоит из аэратора 10 и стенки 7, которая отделяет образуемый газлифтным эффектом восходящий поток от остального объёма аэротенка. Подача воздуха в затопленную эрлифтную систему обеспечивается компрессором 2 и контролируется газовым счётчиком 1. Зона отстаивания III отделена от аэротенка I перегородкой 4 с наклонным козырьком 3. Нисходящий поток, возникающий в аэротенке за пределами эрлифта, провоцирует возникновение водоворотной зоны в осветлителе II. В водоворотной зоне имеют место нисходящее движение жидкости, в котором осуществляется рециркуляция иловой смеси из осветлителя в аэротенк, и восходящее движение, которое обеспечивает существование в зоне осветления взвешенного слоя с постепенно убывающей восходящей скоростью осветляемой жидкости. Границей между осветлителем и отстойником является поверхность илоразделения, визуально наблюдаемая через прозрачные стенки корпуса 6 модели аэротенка-осветлителя. Скорость восходящего потока жидкости в осветлителе зависит от расхода жидкости, который подаётся в сооружение насосом 9 и отводится по трубке 5 в ёмкость 8, а также от производительности затопленного эрлифта.

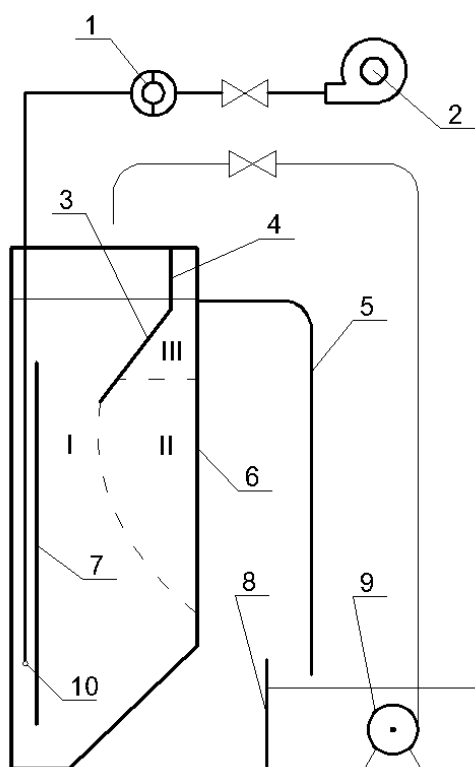


Рисунок 1 Схема экспериментальной установки аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

На лабораторной модели исследуемого аэротенка-осветлителя (рис. 1) была подтверждена возможность рециркуляции в нём ила без дополнительного насосного оборудования, определены гидродинамические параметры, способствующие поддержанию частиц ила во взвешенном состоянии и осветлению иловой смеси [2, 3]. Данные относительно требуемых гидродинамических параметров производственного аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной аэрацией до настоящего времени не освещались.

При моделировании результатов лабораторных исследований на натурный промышленный объект необходимо соблюдать геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

**Цель.** Задачей экспериментальных исследований является определение критериальных параметров, которые необходимо учитывать при проектировании натурального аэро-

тенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации на основании данных лабораторных испытаний его модели.

**Изложение материала и его результаты.** При расчёте взвешенного слоя осветлителя значимыми факторами являются гидравлическая нагрузка, параметры фильтрующей загрузки (диаметр и плотность частиц) и физические свойства жидкости. Течение во взвешенном слое происходит в пористой зернистой среде, в которой режим движения восходящего потока определяется размерами пор, а не общей площадью осветлителя. При моделировании колонны осветлителя учитывается соответствие высоты и концентрации взвешенного слоя, но не принимается во внимание подобие поперечных размеров [4].

При расчёте водоворотных зон, образуемых за плохо обтекаемым телом, основными величинами являются скорость и геометрические параметры потока перед его расширением и после него. Постоянство критериев Рейнольдса и Фруда не является обязательным, если их изменение осуществляется в пределах области, в которой этим изменением можно пренебречь, то есть, когда выполняется автомодельность по данным критериям. Для выполнения автомодельности по числу Рейнольдса движения модельного и натурального потоков должны соответствовать квадратичной зоне сопротивления. Автомодельность по критерию Фруда выполняется при  $Fr < 0,05 \div 0,1$  [5].

На рисунке 2 представлено графическое изображение модели аэротенка-осветлителя с указанием принятых обозначений линейных геометрических параметров.

В исследованной области модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации число Рейнольдса составило  $Re \approx 2100 \div 4900$ , число Фруда —  $Fr \approx 3,5 \div 19,2 \cdot 10^{-3}$ . Критерии определялись по формулам:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{экв}}{\mu}; \quad (1)$$

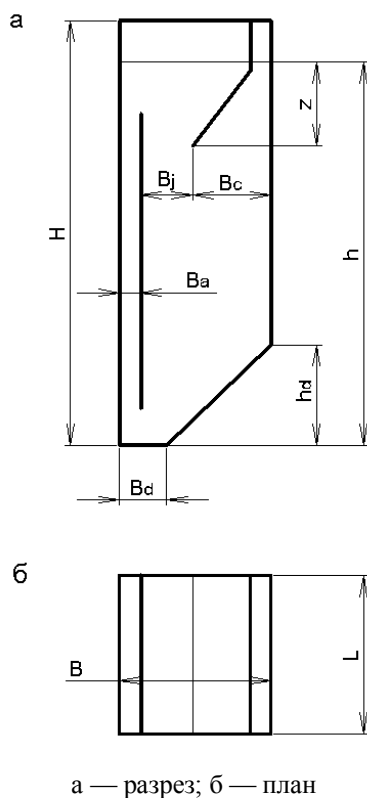
$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot d_{\text{экв}}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность иловой смеси,  $\text{кг/м}^3$ ,  
 $v$  — средняя скорость течения жидкости в зазоре между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта,  $\text{м/с}$ ;  $d_{\text{экв}}$  — эквивалентный диаметр сечения, вычисляемый по формуле 3,  $\text{м}$ ;  $\mu$  — динамическая вязкость иловой смеси,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot B_j \cdot L}{B_j + L}, \quad (3)$$

где  $L$  — длина аэротенка-осветлителя,  $\text{мм}$ ;  
 $B_j$  — расстояние между нижней кромкой наклонного козырька и стенкой затопленного эрлифта,  $\text{мм}$ .

Расчёт произведён для сечения, находящегося между стенкой затопленного эрлифта и нижней кромкой наклонного козырька.



а — разрез; б — план

Рисунок 2 Обозначения размеров корпуса аэротенка-осветлителя

Критерий Фруда в модельном аэротенке-осветлителе гораздо меньше  $0,05 \div 0,1$ . В натурном сооружении, при соблюдении геометрического и кинематического подобия, число Фруда примет ещё меньшие значения. Следовательно, по критерию Фруда в области значений, соответствующих условиям модельного и натурального аэротенка-осветлителя, автомодельность выполняется.

Условие выполнения автомодельности по числу Рейнольдса значительно зависит от шероховатости стенок, а фактическое значение критерия весьма различно в сжатом и несжатом сечениях зоны аэротенка, в различных точках водоворотной зоны осветлителя, в порах зернистого взвешенного слоя активного ила. Касательно того, является ли исследуемая область автомодельной по критерию Рейнольдса, сложно сделать достоверный вывод на основании только теоретических данных.

С целью проверки автомодельности по критерию Рейнольдса была собрана вторая модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной аэрацией, геометрически подобная исходной модели. Модель 2 выполнена в масштабе 2:1 относительно исходной модели 1. Значения числа Рейнольдса в модели 2 вдвое превышают числа Рейнольдса в модели 1 при аналогичных величинах скоростей течения потоков. Критерий Рейнольдса в условиях натурального производственного аэротенка-осветлителя будет увеличиваться пропорционально линейным размерам, если осуществлять масштабирование с соблюдением геометрического и кинематического подобий. Если в модели число Рейнольдса достигает значения, соответствующего квадратичной области, то и в натурном объекте будет иметь место зона квадратичного сопротивления. Таким образом, в случае подтверждения автомодельности по критерию Рейнольдса в области исследуемых моделей подтвердится и автомодельность в области действия натурального сооружения.

Размеры исследуемых моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Значения размеров экспериментальных моделей

Обозначение размера на рисунке 2	Значение соответствующего размера, мм	
	Модель 1	Модель 2
$H_p$	407	814
$h$	370	740
$h_d$	96	191
$z$	80	160
$B$	145	288
$B_a$	20	38
$B_j$	30	60
$B_c$	95	187
$B_d$	45	90
$L$	151	302

Измеренный расход подаваемой в аэротенк и осветляемой в осветлителе жидкости выражался через гидравлическую нагрузку на осветлитель  $q_r$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Гидравлическая нагрузка на осветлитель рассчитывалась по формуле 4, как отношение подачи насоса 9 к площади осветлителя на уровне нижней кромки наклонного козырька:

$$q_r = \frac{60 \cdot Q_n}{L \cdot B_c}; \quad (4)$$

Вычисление подачи затопленного эрлифта осуществлялось по зависимостям [6], исходя из объёма подаваемого в него воздуха. Расход циркулирующей в затопленном эрлифте иловой смеси выражался в виде интенсивности циркуляции  $I_{ц}$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Под интенсивностью циркуляции подразумевается отношение производительности затопленного эрлифта к поперечному сечению нисходящего потока аэротенка на уровне нижней кромки наклонного козырька (формула 5):

$$I_{ц} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot Q_a}{L \cdot B_j}, \quad (5)$$

где  $Q_n$  — расход осветлённой жидкости, вытекающей из аэротенка осветлителя, мл/мин;  $Q_a$  — производительность затопленного эрлифта, л/мин;  $B_c$  — ширина

осветлителя, измеренная на уровне нижней кромки наклонного козырька, мм.

Опыты производились с использованием активного ила, отобранного из аэротенка-вытеснителя канализационной очистной станции г.Макеевки. Концентрация взвешенных веществ в иловой смеси составляла около 5,5 г/л, иловый индекс —  $90 \div 110 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Экспериментальным путём находилась такая максимальная гидравлическая нагрузка на осветлитель, при которой граница между зоной осветления (взвешенный слой) и зоной отстаивания (защитный слой) в установившемся состоянии не превышает критического уровня. Критическим уровнем считалось такое положение поверхности илоразделения, при котором она не нарушается в результате всасывания осветлённой жидкости в отводящую трубку. Максимальная гидравлическая нагрузка на осветлитель в обеих исследуемых моделях аэротенка-осветлителя определялась при различных значениях подачи воздуха в аэрационную систему.

В таблице 2 приведены значения интенсивностей циркуляции  $I_{ц}$  иловой смеси в аэротенке и значения соответствующих им максимальных допустимых гидравлических нагрузок  $q_r$ , полученные при испытании геометрически подобных моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. Точки, построенные по данным таблицы 2, и проведённые по ним кривые представлены на рисунке 3.

Таблица 2  
Результаты экспериментального исследования

Модель 1		Модель 2	
$I_{ц}$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$q_r$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$I_{ц}$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$q_r$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
159	1,46	135	1,78
186	1,07	150	1,66
190	1,09	168	1,50
195	1,34	198	0,98
243	0,64	204	1,11
277	0,68	229	0,75
279	0,50	250	0,69
313	0,52	275	0,68
423	0,37	300	0,59

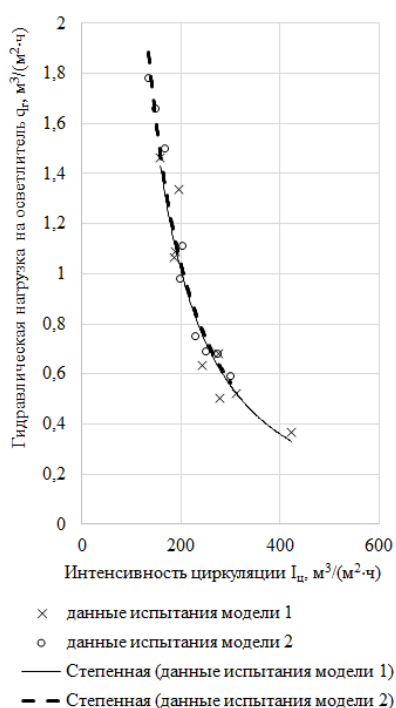


Рисунок 3 Результаты экспериментального исследования

Как видно из рисунка 3, графики, характеризующие зависимости максимальной гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции в модели 1 и модели 2, практически идентичны. Совпадение результатов экспериментов, проведённых на двух геометрически подобных моделях аэротенкоосветителя, указывает на отсутствие значимости масштаба сооружения при определении его гидродинамических параметров.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В ходе экспериментальных исследований выяснилось, что гидродинамические параметры, требуемые для работы взвешенного слоя в аэротенкоосветителе с затопленной эрлифтной системой аэрации, не зависят от величины сооружения. При осуществлении моделирования необходимым и достаточным является соблюдение геометрического подобия проектируемого натурального сооружения и исследованной лабораторной модели.

### Библиографический список

1. Нездойминов, В. И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем [Электронный ресурс] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. — 2016. — № 5 (121). — С. 15–19. — Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=30039829> (24.05.18).
2. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенко-осветителе [Электронный ресурс] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. — 2017. — № 3 (125). — С. 80–85. — Режим доступа : [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_30317130\\_57901437.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_30317130_57901437.pdf) (4.12.17).
3. 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 междунар. науч.-практич. конф. — Новочеркасск : Лик, 2017. — С. 268–272.
4. Нездойминов, В. И. Математичний опис основних факторів, що впливають на формування зваженого шару осаду в муловідділювачі [Электронный ресурс] / В. И. Нездойминов, В. И. Зятіна, В. С. Рожков, В. И. Лесной // Сучасне промислове та цивільне будівництво. — 2016. — Т. 12, № 2 — С. 51–58. — Режим доступа : [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2016-2/01\\_nezdoyminov\\_zyatina\\_rozhkov\\_lesnoy.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2016-2/01_nezdoyminov_zyatina_rozhkov_lesnoy.pdf) (24.05.18).
5. Малаханов, В. В. Гидравлическое исследование нижнего бьефа водотранспортного гидроузла на аэродинамической модели [Электронный ресурс] / В. В. Малаханов // Вестник МГСУ — 2014. — № 2. — С. 153–163. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21225883> (25.05.2018).
6. 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.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ВВиОВР ДонНАСА Нездойминовым В. И., д.т.н., проф. каф. ГиПС ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.*

*Статья поступила в редакцию 29.05.18.*

**Заворотний Д. В.** (ДонНАБА, м. Макіївка, ДНР)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОТЕНКІВ-ОСВІТЛЮВАЧІВ З ЗАТОПЛЕНОЮ ЕРЛІФТНОЮ СИСТЕМОЮ АЕРАЦІЇ**

*Наведено результати експериментальних досліджень геометрично подібних моделей аеротенка-освітлювача з затопленою ерліфтною системою аерації. На підставі отриманих даних доведено, що визначення максимальних припустимих швидкостей плинку потоків у виробничому аеротенку-освітлювачі з затопленою ерліфтною системою аерації, який проектується, слід виконувати із дотриманням тільки геометричної подібності.*

**Ключові слова:** аеротенк-освітлювач, завислий шар, гідравлічне навантаження, подібність, автотомельність, активний мул, аеротенк-відстійник, муловіділення.

**Zavorotnyi D. V.** (DonNABA, Makeyevka, DPR)

**EXPERIMENTAL DETERMINING THE PARAMETERS FOR DESIGNING THE AIR TANK-CLARIFIERS WITH SUBMERGED AIRLIFT AERATION SYSTEM**

*There have been given the research results on geometrically similar models of the air tank-clarifiers with submerged airlift aeration system. Based on the obtained results there has been proved that determination of maximum allowable flow speeds in the designed industrial air tank-clarifiers with submerged airlift aeration system should be done observing only the geometrical similarity.*

**Key words:** air tank-clarifier, suspended layer, hydraulic load, similarity, automatic modelling, active sludge, air tank-sump, desilting.

