

УДК 628.35+532.5

Д. В. ЗАВОРОТНЫЙ, А. М. УВАРОВА, Т. В. ПАНЬКОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЭРЛИФТНОМ
БИОРЕАКТОРЕ-ОСВЕТИТЕЛЕ**

Аннотация. В статье дан анализ существующих математических моделей эрлифтных биореакторов-осветлителей. Представлена конструкция и принцип действия исследуемого сооружения биологической очистки сточных вод. Выполнен краткий обзор применения программ вычислительной гидродинамики для теоретического исследования движения жидкостных и водовоздушных потоков в эрлифтных биологических реакторах. При помощи программного комплекса FlowVision вычислены гидродинамические параметры потоков в эрлифтном биореакторе-осветлителе. Представлены результаты расчётов при отсутствии нагрузки на осветлитель и интенсивности циркуляции $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для различных полуэмпирических моделей турбулентности: стандартная k-ε модель, квадратичная k-ε модель, SST-модель, k-ε модель FlowVision. Определена полуэмпирическая турбулентная модель, которая наиболее точно характеризует параметры водоворотной зоны эрлифтного биореактора-осветлителя.

Ключевые слова: эрлифтный биореактор, осветлитель, вычислительная гидродинамика, модель турбулентности, очистка сточных вод.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эрлифтный биореактор-осветлитель (рис. 1) является сооружением для биологической очистки сточных вод, скомбинированным из эрлифтного биореактора и осветлителя со взвешенным слоем активного ила. В эрлифтном биореакторе жидкость циркулирует и контактирует с воздухом за счёт действия затопленного эрлифта. Затопленный эрлифт состоит из эрлифтной стенки 1 и аэратора 2. Взвешенный слой в эрлифтном биореакторе-осветлителе образуется благодаря наклонному козырьку 3.

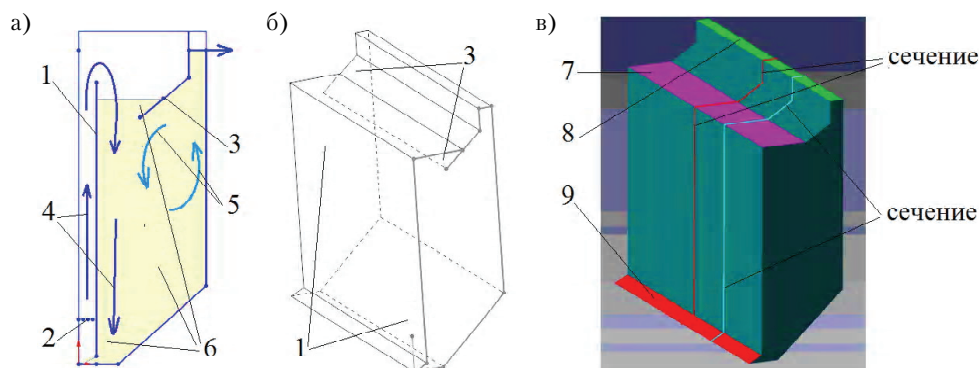


Рисунок 1 – Эрлифтный биореактор-осветлитель: а) схема потоков; б, в) объёмные модели расчётной области: 1 – стенка затопленного эрлифта; 2 – аэратор; 3 – козырёк; 4 – циркуляционный поток; 5 – водоворотная зона; 6 – расчётная область; 7 – сечение входа циркуляционного потока в расчётную область; 8 – сечение выхода осветлённой жидкости; 9 – сечение свободного выхода в затопленный эрлифт.

Для циркуляционного потока 4 козырёк является плохообтекаемой перегородкой и способствует образованию водоворотной зоны 5. В восходящем потоке водоворотной зоны поддерживается самообновляющийся взвешенный слой, в котором иловая смесь осветляется перед выходом из сооружения [1].

До настоящего времени для теоретического описания гидродинамических параметров водоворотной зоны эрлифтного биореактора-осветлителя применялись математические модели, базирующиеся на теории турбулентных струй [1] и на методе конечных разностей [2]. Обе модели полагаются преимущественно на эмпирические коэффициенты, представленные в теории турбулентных струй. Это ставит под сомнение точность вычислений при определённых геометрических и кинематических отличиях эрлифтных биореакторов-осветлителей от объектов, исследования которых сформировали значения применяемых коэффициентов. Это делает актуальным поиск новых путей теоретического определения гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Представить теоретическое описание турбулентных потоков без применения эмпирических поправок на сегодняшний день не представляется возможным. Несмотря на это, методами вычислительной гидродинамики с высокой точностью решается широкий спектр задач, в том числе по вычислению гидродинамических параметров сооружений очистки сточных вод. Теоретическое испытание различных усовершенствований эрлифтных биореакторов осуществлялось А. Ю. Лучиной и Ф. В. Недопёкиным при помощи пакета программ ANSYS [3], М. Аль-Машхадани, С. Вилкинсоном и У. Зиммерманом с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics [4] и многими другими учёными с применением различных программ. Применение программных комплексов вычислительной гидродинамики для теоретического описания процессов в эрлифтных биореакторах-осветлителях до настоящего времени не освещалось в научной литературе.

Ключевым моментом при расчёте турбулентных течений является выбор модели турбулентности, наиболее подходящей для конкретных условий. При моделировании в программном комплексе FlowVision обтекания тела потоком рекомендуется применять стандартную $k-\varepsilon$ (KES), квадратичную $k-\varepsilon$ (KEQ) или SST-модель [5].

ЦЕЛИ

Провести расчёт величин и направлений скоростей течения жидкости в пределах расчётной области 7 (рис. 1) эрлифтного биореактора-осветлителя при помощи программного комплекса FlowVision. На основании полученных результатов определить наиболее приемлемую для проведения дальнейших теоретических исследований модель турбулентности.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для проведения расчётов построена 3D-модель биореактора-осветлителя (рис. 1 б). Фиксирование гидродинамических параметров осуществлялось в характерных вертикальных сечениях № 1 и № 2. В качестве исходных расчётных параметров принято нулевое значение расхода в сечении выхода осветлённой жидкости 8 и массовая скорость $11 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ в сечении входа циркуляционного потока в расчётную область 7 (рис. 1 в). Это соответствует интенсивности циркуляции [1] в самом узком сечении между козырьком и стенкой затопленного эрлифта $I_{\text{ц}} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Принята интенсивность турбулентности 0,1 и масштаб турбулентности 0,0095 (из расчёта равенства максимального размера вихря ширине подкозырьковой зоны).

На рисунке 2а представлены результаты вычислений величин скоростей в сечении № 1 программным комплексом FlowVision. Анализ результатов говорит о нецелесообразности применения SSE и KES моделей, поскольку вблизи сечения выхода осветлённой жидкости образуются значительные скорости при отрыве от остальных интенсивных потоков. Полученные величины не обоснованы и не соответствуют реальным токам в эрлифтном биореакторе-осветлителе при отсутствии нагрузки на осветлитель. $k-\varepsilon$ модель FlowVision (KEFV) и KEQ дают сравнительно правдоподобные результаты.

На рисунке 2в представлены результаты вычислений в контрольном сечении № 2. При использовании турбулентной модели KEFV наблюдается нисходящий поток в области фактического образования восходящего течения водоворотной зоны. Это говорит о нецелесообразности применения данной модели для моделирования эрлифтного биореактора-осветлителя. В случае применения турбулентной модели KEQ получаемые в FlowVision векторы скоростей отражают результаты испытаний

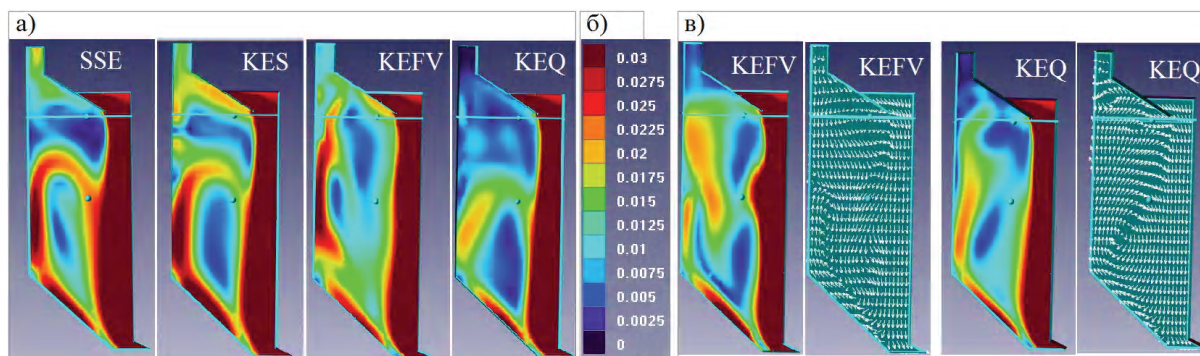


Рисунок 2 – Результаты вычислений: а) величины скоростей в сечении № 1; б) обозначение величины скорости, м/с; в) величины и направления скоростей в сечении № 2.

физической модели. Нисходящие и восходящие токи в пределах расчётной области разделены условной линией, которая соответствует описанной в теории турбулентных струй границе между затопленной струей и встречным потоком, который образуется за плохообтекаемым телом. Таким образом, применение программного комплекса FlowVision для моделирования движения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе целесообразно при использовании квадратичной k - ϵ модели турбулентности.

ВЫВОД

Программный комплекс FlowVision является весьма перспективным средством при изучении гидродинамических процессов. Определено, что наиболее точно параметры водоворотной зоны эрлифтного биореактора-осветлителя характеризует квадратичная k - ϵ модель турбулентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Permissible parameters for the circulation rate of the sludge mixture in airlift reactor-clarifier with suspended layer / V. Nezdoinov, D. Zavorotnyi, V. Rozhkov, P. Deminov. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences – 2018. – Vol. 245. – URL : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824511009> (дата обращения: 11.03.2021).
2. Математическое описание гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя / В. И. Нездойминов, Н. Н. Голоденко, Д. В. Заворотный, О. В. Майстренко. – Текст : непосредственный // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 84–96.
3. Лучина, А. Ю. Биологическая очистка сточных вод в аэротенках с затопленной пневматической системой аэрации / А. Ю. Лучина, Ф. В. Недопекин. – Текст : электронный // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 68–75. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37219938> (дата обращения: 11.03.2021).
4. Al-Mashhadani, M. K. H. Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes / M. K. H. Al Mashhadani, S. J. Wilkinson, W. B. Zimmerman. – Текст : непосредственный // Chemical Engineering Science. – 2015. – Vol. 137. – P. 243–253. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032> (дата обращения: 11.03.2021).
5. Субботина, П. М. Применение различных моделей турбулентности для задач внешнего обтекания в программном комплексе FlowVision / П. М. Субботина, А. С. Шишаева. – Текст : электронный // Современные технологии – в промышленность. – 8 с. – URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es08_turbul.pdf (дата обращения: 11.03.2021).

Получена 27.04.2021

Д. В. ЗАВОРОТНИЙ, О. М. УВАРОВА, Т. В. ПАНЬКОВА
 ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ FLOWVISION ДЛЯ
 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ РІДИНИ В ЕРЛІФТНОМУ БІОРЕАКТОРІ-
 ОСВІТЛЮВАЧІ
 ДОО ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті надано аналіз існуючих математичних моделей ерліфтних біореакторів-освітлювачів. Представлена конструкція та принцип дії дослідженої споруди з біологічної очистки стічних

вод. Виконано стислий огляд застосування програми обчислювальної гідродинаміки для теоретичного дослідження руху рідинних та водоповітряних потоків в ерліфтних біологічних реакторах. За допомогою програмного комплексу FlowVision вчислені гідродинамічні параметри потоків в ерліфтному біореакторі-освітлювачі. Представлені результати розрахунків при відсутності навантаження на освітлювач та інтенсивності циркуляції $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ для різних напівемпіричних моделей турбулентності: стандартна k-ε модель, квадратична k-ε модель, SST-модель, k-ε модель FlowVision. Визначена турбулентна модель, яка найбільш точно відображає параметри водоворотної зони ерліфтного біореактора-освітлювача.

Ключові слова: ерліфтний біореактор, освітлювач, обчислювальна гідродинаміка, модель турбулентності, очистка стічних вод.

DMITRII ZAVOROTNYI, UVAROVA ALEXANDRA, PANKOVA TATYANA
APPLICATION OF THE «FLOWVISION» SOFTWARE COMPLEX FOR
SIMULATION OF FLUID MOTION IN AIRLIFT BIOREACTOR-CLARIFIER
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article a analysis of the existing mathematical models of airlift bioreactors-clarifiers have been presented. The design and principle of operation of the investigated biological wastewater treatment facility are presented. A brief review of the application of computational fluid dynamics programs for the theoretical study of the motion of liquid and water-air flows in airlift biological reactors is carried out. Hydrodynamic parameters of flows in the airlift bioreactor-clarifier were calculated by a software package «FlowVision». The results of calculations in the absence of a load on the clarifier and a circulation rate of $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{h})$ for various semi-empirical turbulence models are presented: standard «k-ε» model, «quadratic k-ε» model, SST-model, «k-ε FlowVision» model. Has been determined the semi-empirical turbulent model, which most accurately characterizes the parameters of the eddy zone of the airlift bioreactor-clarifier.

Key words: airlift bioreactor, clarifier, computational fluid dynamics, turbulence model, waste water treatment.

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

Уварова Александра Михайловна – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: очистка сточных вод.

Панькова Татьяна Витальевна – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: очистка сточных вод.

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

Уварова Олександра Михайлівна – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: очистка стічних вод.

Панькова Тетяна Віталіївна – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: очистка стічних вод.

Zavorotnyi Dmitrii – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: sewerage, mechanics of fluids.

Uvarova Alexandra – master's student of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: wastewater treatment.

Pankova Tatyana – master's student of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: wastewater treatment.