

УДК 628.356

**Д. В. ЗАВОРОТНЫЙ, А. М. УВАРОВА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭРЛИФТНЫХ БИОРЕАКТОРАХ-ОСВЕТИТЕЛЯХ**

**Аннотация.** В статье приводится сравнение цилиндрических (круглых в плане) и прямоугольных в плане эрлифтных биологических реакторов-осветлителей. Эрлифтные биореакторы-осветлители являются сооружениями для очистки сточных вод. В них происходят процессы биологической очистки при помощи активного ила, для обеспечения дыхания которого применяется затопленный эрлифт, и осветления иловой смеси во взвешенном слое ила. Проанализировано влияние интенсивности циркуляции иловой смеси в эрлифтных биореакторах на скорости восходящего потока в осветлителях. В программном комплексе FlowVision при помощи квадратичной  $k-\varepsilon$  модели турбулентности выполнено вычисление скоростей жидкости в исследуемых очистных сооружениях. На основании результатов вычислений, часть которых представлена в данной статье, получено теоретическое соотношение максимальных допустимых интенсивностей циркуляции в цилиндрических и прямоугольных в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях.

**Ключевые слова:** эрлифтный биореактор, биореактор-осветлитель, FlowVision, очистка сточных вод.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Эрлифтный биореактор-осветлитель для биологической очистки сточных вод (рисунок 1а) представляет собой ёмкость с конструктивными перегородками (наклонный козырёк 1 и стенки затопленного эрлифта 2) и аэратором 3. В результате подачи аэраторами воздуха, помимо обеспечения жизнедеятельности активного ила, осуществляется образование токов жидкости в сооружении: над аэраторами, между стенками затопленного эрлифта, возникает восходящий поток, а за пределами затопленного эрлифта – соответственно, нисходящий. Такое течение наблюдается и в эрлифтных биореакторах, не совмещённых с осветлителями [1]. Под наклонным козырьком образуется водоворотная зона, скорости течения в которой значительно меньше, чем скорости токов, циркулирующих через затопленный эрлифт. Восходящие токи водоворотной зоны поддерживают ил во взвешенном состоянии, а нисходящие способствуют обмену частицами ила с интенсивным нисходящим потоком эрлифтного биореактора [2, 3].

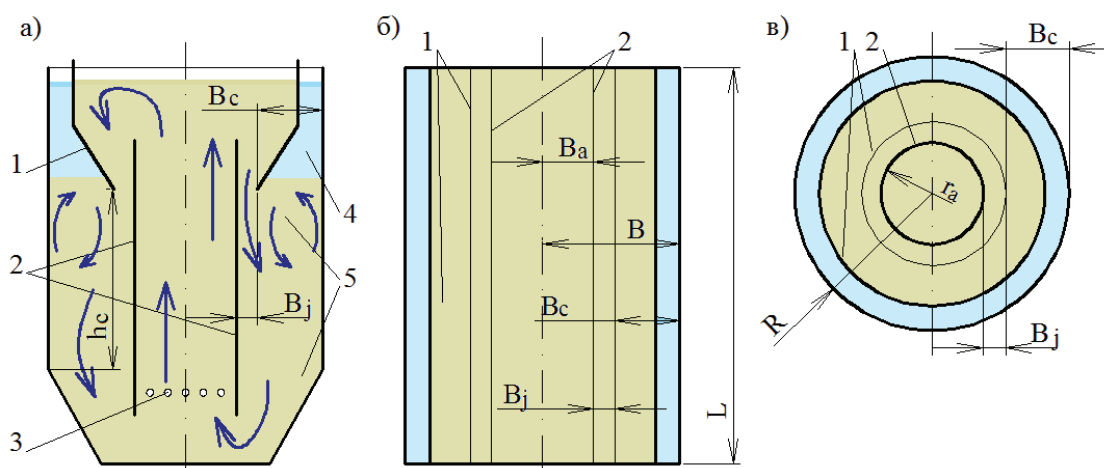
Теоретически, эрлифтный биореактор-осветлитель может иметь прямоугольную в плане (рисунок 1 а, б) либо цилиндрическую (рисунок 1 а, в) форму. Для прямоугольных в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей получены зависимости [3] допустимой интенсивности циркуляции ( $I_{ц(нр)}$ , по формуле (1)) от гидравлической нагрузки на осветлитель ( $q_{з(нр)}$  по формуле (2)).

$$I_{ц(нр)} = \frac{Q_a}{\omega_{j(нр)}} = \frac{Q_a}{B_j \cdot 2L}; \quad (1)$$

$$q_{з(нр)} = \frac{Q_a}{\omega_{с(нр)}} = \frac{Q_{см}}{B_c \cdot 2L}, \quad (2)$$

где  $Q_a$  – расход жидкости, циркулирующей через затопленный эрлифт, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{см}$  – расход очищаемой сточной жидкости, м<sup>3</sup>/ч;

$\omega_{j(np)}$  – площадь сечения в зазоре между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта, м<sup>2</sup>;  
 $\omega_{c(np)}$  – условная площадь поперечного сечения осветлителя, м<sup>2</sup>;  
 $B_c$  – условная ширина осветлителя, м;  
 $B_j$  – ширина зазора между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта, м;  
 $L$  – длина прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя, м (рис. 1).



**Рисунок 1** – Эрлифтный биореактор-осветлитель: а) вертикальный разрез с направлениями течения жидкости; б) план при прямоугольной форме; в) план при цилиндрической форме: 1 – наклонный козырёк; 2 – стенки затопленного эрлифта; 3 – аэраторы; 4 – осветлённая жидкость; 5 – активный ил.

Соотношения между допустимыми значениями интенсивности циркуляции ( $I_{u(цил)}$ ) (формула (3)) и гидравлической нагрузки ( $q_{z(цил)}$ ), формула (4)) в цилиндрических эрлифтных биореакторах-осветлителях на данный момент не исследованы.

$$I_{u(цил)} = \frac{Q_a}{\omega_{j(цил)}} = \frac{Q_a}{B_j(2r_a + B_j)}; \quad (3)$$

$$q_{z(цил)} = \frac{Q_a}{\omega_{c(цил)}} = \frac{Q_{cm}}{B_c(2R - B_c)}, \quad (4)$$

где  $r_a$  – радиус затопленного эрлифта, м;  
 $R$  – радиус корпуса цилиндрического эрлифтного биореактора-осветлителя, м.

Перспективность применения цилиндрических эрлифтных биореакторов-осветлителей обуславливается, к примеру, удобством их конструирования из полимерных труб большого диаметра, однако ограничивается недостаточными исследовательскими данными, обеспечивающими правильный подбор гидродинамических параметров сооружения.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время развитие вычислительной гидродинамики позволяет использовать методы численного моделирования как альтернативу эксперимента. Для численного моделирования течения жидкости широко используется разработанный в России программный комплекс FlowVision, эффективность которого доказана большим количеством хорошо зарекомендовавших себя примеров сопоставления численного моделирования и экспериментальных исследований [4].

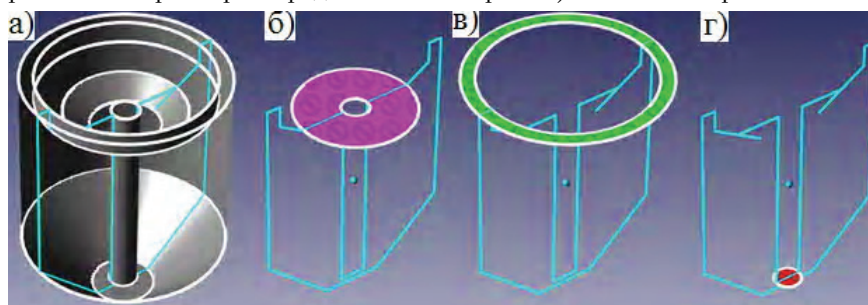
При численном моделировании турбулентных течений ключевым моментом является выбор модели турбулентности, наиболее точно отображающей параметры токов в конкретных условиях. При расчёте гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей в программном комплексе FlowVision рекомендуется применять стандартную квадратичную k-ε модель (KEQ) [5].

## ЦЕЛЬ

Определить теоретическое отношение допустимых интенсивностей циркуляции в цилиндрических и прямоугольных в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

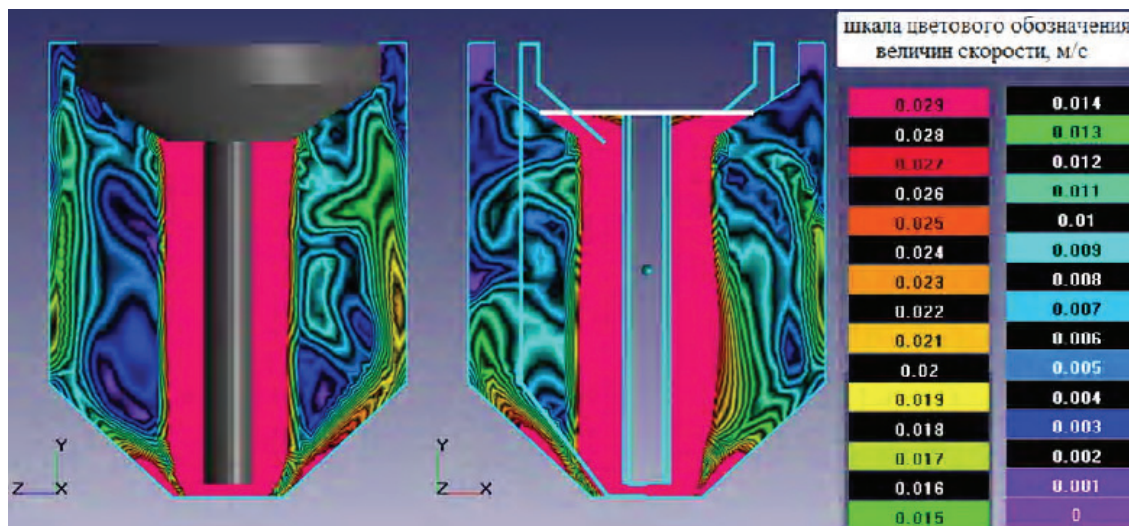
Для проведения расчётов построены геометрические модели расчётных областей цилиндрического (рис. 2) и прямоугольного в плане эрлифтных биореакторов-осветлителей со следующими размерами:  $h_c = 192$  мм,  $B_j = 30$  мм,  $B_c = 95$  мм,  $B_a = r_a = 20$  мм,  $R = B = 145$  мм,  $L = 455$  мм (обозначения геометрических параметров представлены на рис. 1). В качестве расчётных областей приняты пространства



**Рисунок 2** – Геометрическая модель цилиндрического эрлифтного биореактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision: а) границы расчётной области, образованные твёрдыми стенками; б) сечение входа жидкости в расчётную область; в) свободная поверхность очищенной жидкости; г) выход в затопленный эрлифт.

внутри эрлифтных биореакторов-осветлителей, ограниченные: твёрдыми стенками (рис. 2а); горизонтальным сечением нисходящего потока эрлифтного биореактора (рис. 2б), расположенным между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта на уровне середины наклонного козырька; свободной поверхностью осветлённой жидкости (рис. 2в); сечением входа в затопленный эрлифт (рис. 2г).

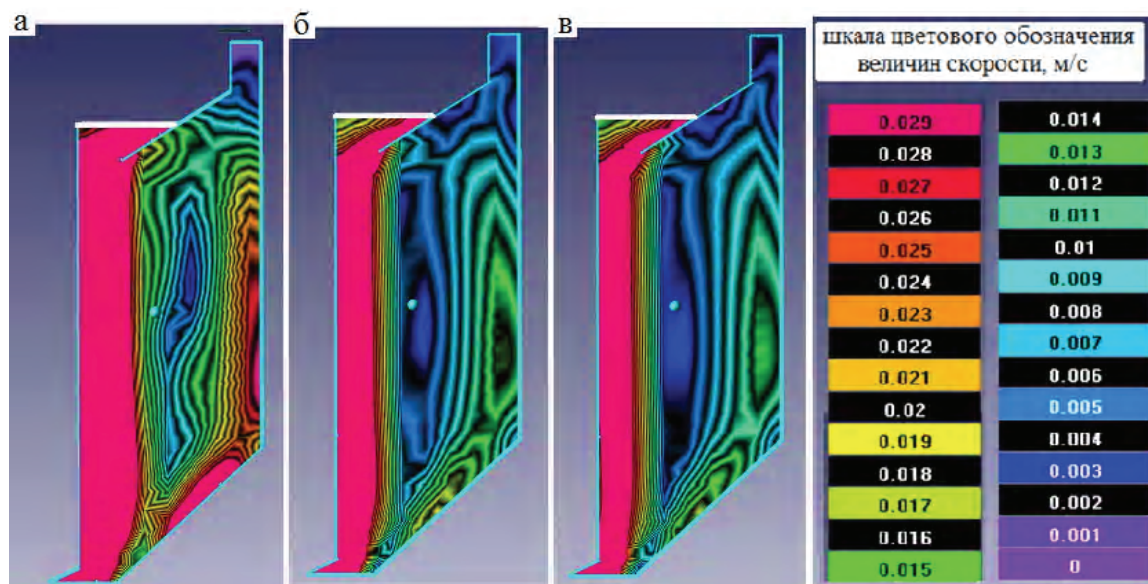
На рисунке 3 представлены результаты расчёта в программном комплексе FlowVision величин скоростей воды в цилиндрическом эрлифтном биореакторе-осветлителе при интенсивности циркуляции  $I_{ц(цил)} = 400$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), что соответствует массовой скорости в сечении входа в расчётную область 21,9 кг/(м<sup>2</sup>·с). Интенсивность турбулентности принята  $I_t = 0,5$ , масштаб турбулентности назначен 0,0475, модель турбулентности – KEQ.



**Рисунок 3** – Результаты вычислений скоростей по двум взаимоперпендикулярным плоскостям расчётной области цилиндрического эрлифтного биореактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision при интенсивности циркуляции  $I_{ц(цил)} = 400$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Скорость восходящего потока в осветлителе, определяемая на глубине относительно низа козырька  $h = h_c = 96$  мм как средняя из максимальных скоростей восходящих потоков по левой и правой стороне модели в каждой из взаимоперпендикулярных плоскостей (рис. 3), составила 12 мм/с.

Для определения теоретического соотношения допустимых интенсивностей циркуляции в прямоугольных в плане и цилиндрических эрлифтных биореакторах-осветлителях геометрическая модель прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя рассчитывалась с различными скоростями во входном сечении. При интенсивности циркуляции  $I_{u(np)} = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (рис. 4а) скорость в восходящем потоке расчётной области прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя на глубине  $h = h_c = 96 \text{ мм}$  составила 26 м/с. При  $I_{u(np)} = 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составила 13 мм/с (рис. 4 б). При интенсивности циркуляции  $I_{u(np)} = 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  скорость в восходящем потоке осветлителя составляет 12 мм/с (рис. 4 в), что соответствует скорости восходящего потока в осветлителе цилиндрического эрлифтного биореактора-осветлителя при сходственных размерах и интенсивности циркуляции  $I_{u(цил)} = 400 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .



**Рисунок 4** – Результаты вычислений скоростей в расчётной области прямоугольного в плане эрлифтного биореактора-осветлителя в программном комплексе FlowVision при интенсивности циркуляции: а)  $I_u = 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; б)  $I_u = 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; в)  $I_u = 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Отношение приводящих к образованию одинаковых скоростей в осветлителе интенсивностей циркуляции в цилиндрических и прямоугольных в плане моделях составило  $I_{u(цил)}/I_{u(np)} = 400 / 120 = 3,33$ . Аналогичные теоретические исследования при  $I_{u(цил)} = 600 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и тех же геометрических параметрах привели к результату  $I_{u(цил)}/I_{u(np)} = 600 / 150 = 4$ . В обоих случаях повышение интенсивности циркуляции при переходе от прямоугольной к круглой в плане форме превышает вызванное этим увеличение соотношения между площадями  $\omega_c$  и  $\omega_j$  (для исследованных геометрических моделей  $(\omega_{c(цил)}/\omega_{j(цил)})/(\omega_{c(np)}/\omega_{j(np)}) = 2,79$ ). Анализ общей картины скоростей на рис. 3, 4 свидетельствует о том, что в цилиндрических эрлифтных биореакторах-осветлителях имеет место менее равномерное снижение скорости восходящего потока по высоте и более сложный характер эпюр скорости в горизонтальных сечениях. Таким образом, получение достоверной зависимости допустимой интенсивности циркуляции от гидравлической нагрузки и геометрических параметров цилиндрических эрлифтных биореакторов следует осуществлять не на основании известных зависимостей для эрлифтных биореакторов-осветлителей, а путём отдельных исследований.

### ВЫВОД

Цилиндрические эрлифтные биореакторы-осветлители по сравнению с эрлифтными биореакторами-осветлителями, имеющими прямоугольную в плане форму, имеют в несколько раз (около 3–4) большую допустимую интенсивность циркуляции. При этом соотношение допустимых интенсивностей циркуляции в цилиндрических и прямоугольных в плане эрлифтных биореакторах-осветлителях не является постоянной величиной, а зависит от их геометрических и гидродинамических параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naidoo, N. Effects of sparger design on the gas holdup and mass transfer in a pilot scale external loop airlift reactor / N. Naidoo, W. J. Paucka, M. Carsky. – Текст : электронный // South African Journal of Chemical Engineering. – 2021. – V. 37. – P. 127–134. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.05.009> (дата обращения: 25.09.2021).
2. Рожков, В. С. Доочистка сточных вод на дробленном антраците в системах с эрлифтным биореактором / В. С. Рожков, П. Е. Дёминов, Ю. В. Васильева. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – Выпуск 2020-4(144) Научно-технические достижения студентов строительного-архитектурной отрасли. – С. 87–90. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44068771> (дата публикации: 22.06.2020).
3. Заворотный, Д. В. Экспериментальное определение параметров моделирования аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации / Д. В. Заворотный. – Текст : электронный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2018. – № 10 (53). – С. 104–109. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35538794> (дата обращения: 22.09.2021).
4. CFD Modeling and Study of Additional Medium Jet Impact on the Blade of the Propeller / D. Osovskii, A. Sharatov, A. Gorbenko [et al.]. – Текст : электронный // Procedia Computer Science. – 2020. – V. 167. – P. 1096–1101. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.411> (дата обращения: 27.09.2021).
5. Заворотный, Д. В. Применение программного комплекса FlowVision для моделирования движения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе / Д. В. Заворотный, А. М. Уварова, Т. В. Панькова. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – Выпуск 2021-3(149) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – С. 61–64. – [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2021/vestnik\\_2021-3\(149\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2021/vestnik_2021-3(149).pdf) (дата публикации: 25.06.2021).

Получена 10.09.2021

Д. В. ЗАВОРОТНИЙ, О. М. УВАРОВА  
 ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ  
 ЦИРКУЛЯЦІЇ В ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕРЛІФТНИХ БІОРЕАКТОРАХ-  
 ОСВІТЛЮВАЧАХ  
 ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті наведено порівняння циліндричних (круглих в плані) та прямокутних в плані ерліфтних біологічних реакторів-освітлювачів. Ерліфтні біореактори-освітлювачі є спорудами для очищення стічних вод. В них відбуваються процеси біологічної очистки за допомогою активного мулу, для забезпечення дихання якого застосовується затоплений ерліфт, і освітлення мулової суміші в підвішеному шарі мулу. Проаналізовано вплив інтенсивності циркуляції мулової суміші в ерліфтних біореакторах на швидкості висхідного потоку в освітлювачах. У програмному комплексі FlowVision за допомогою квадратичної  $k-\epsilon$  моделі турбулентності виконано обчислення швидкостей рідини в досліджуваних очисних спорудах. На підставі результатів обчислень, частина яких представлена у даній статті, отримано теоретичне співвідношення максимальних допустимих інтенсивностей циркуляції в циліндричних і прямокутних в плані ерліфтних біореакторах-освітлювачах.

**Ключові слова:** ерліфтний біореактор, біореактор-освітлювач, FlowVision, очистка стічних вод.

DMITRII ZAVOROTNYI, ALEXANDRA UVAROVA  
 THEORETICAL DETERMINATION OF THE PERMISSIBLE CIRCULATION  
 INTENSITY IN CYLINDRICAL AIRLIFT BIOREACTORS-CLARIFIERS  
 Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article presents a comparison of cylindrical (round in plan) and rectangular in terms of airlift biological clarifier reactors. Airlift bioreactors-clarifiers are facilities for wastewater treatment. Biological purification processes take place in them with the help of activated sludge, to ensure the respiration of which a flooded airlift is used, and clarification of the sludge mixture in a suspended layer of sludge. The influence of the intensity of the sludge mixture circulation in airlift bioreactors on the upstream velocity in clarifiers is analyzed. In the FlowVision software package, using a quadratic  $k-\epsilon$  turbulence model, the calculation of fluid velocities in the studied treatment facilities was performed. Based on the results of calculations, some of which are presented in this article, a theoretical ratio of the maximum allowable circulation intensities in cylindrical and rectangular airlift bioreactors-clarifiers is obtained.

**Key words:** airlift bioreactor, bioreactor-clarifier, FlowVision, 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.

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

**Уварова Олександра Михайлівна** – магістрант ДООУ 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, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: wastewater treatment.