

# Сравнение картины течения в прудах-отстойниках разной геометрии\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-80-84>

## ВЫЛЕГЖАНИНА А.В.

Канд. техн. наук, доцент кафедры  
цифровых технологий ФГБОУ ВО «КемГУ»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [alina\\_com@rambler.ru](mailto:alina_com@rambler.ru)

## ЗИМИН А.И.

Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры  
цифровых технологий ФГБОУ ВО «КемГУ»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: [sliii@mail.ru](mailto:sliii@mail.ru)

Загрязненные сточные воды угольных предприятий требуют очистки даже для использования в качестве технических вод и для утилизации их в природных водоемах. Одним из распространенных способов очистки является отстаивание вод в специальных прудах-отстойниках, в которые постоянно закачиваются загрязненные воды и выкачиваются уже очищенные для поддержания уровня воды в пруду. В работе рассмотрены различные конфигурации системы закачивания воды в отстойник с целью исследования характера течения и его влияния на результат очистки. Установлено, что оптимальным является расположение входных труб вблизи поверхности водоема. В водоемах образуются сложные вихревые течения, при этом конфигурация входных труб влияет лишь на незначительной протяженности длины пруда-отстойника.

**Ключевые слова:** течение, идеальная жидкость, вязкая несжимаемая жидкость, очистка сточных вод, мелкодисперсные примеси.

**Для цитирования:** Вылегжанина А.В., Зимин А.И. Сравнение картины течения в прудах-отстойниках разной геометрии // Уголь. 2023. № 12. С. 80-84. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-80-84.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязненные сточные воды угольных предприятий неизбежно появляются в процессе производства. Есть много видов загрязняющих веществ, среди которых можно выделить растворенные химические соединения и твердые частицы. Для очистки сточных вод от твердых взвешенных глинистых частиц сегодня используется несколько технологий, выделяют химические [1, 2] и биологические методы (химические вещества и живые организмы, водоросли, рыбы и другие) [3], фильтрацию через специально создаваемые фильтры [4], а также пруды-отстойники. Пруды-отстойники являются хорошо показавшим себя методом для очистки сточных вод от крупных частиц, но за счет физических свойств мелкодисперсных глиняных частиц, взвешенных в воде, оседание их происходит медленно, и даже спустя продолжительное время (1-2 года) концентрация частиц в воде может составлять до 40% от начальной. Это создает постоянную потребность в сооружении прудов-отстойников, а оптимизация их использования значительно снизила бы потребность в строительстве и упростила обслуживание очистных сооружений [5].

\* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022.



**НОЦ  
КУЗБАСС**

Научно-образовательный  
центр «Кузбасс»

Одним из методов оптимизации работы отстойников для очистки от нерастворимых органических примесей может являться изменение расположения входных труб, по которым закачиваются загрязненные сточные воды. Зарекомендовали себя методы организации входного потока в виде разветвленной структуры труб и труб со щелевидным протяженным отверстием на всю глубину погружения входной трубы [6]. Исследуем влияние расположения входных труб на эффективность очистки сточных вод с использованием прудов-отстойников.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В условиях доступности методов машинного обучения все чаще моделирование оценки качества очистки сточных вод осуществляют на основе обработки исторических данных. Однако у этого подхода есть определенные недостатки, например можно с достаточной точностью прогнозировать уровень загрязнения, однако эти методы не могут помочь прогнозировать качество очистки вод за счет изменения конфигурации прудов-отстойников, поэтому применение традиционных подходов математического моделирования не утрачивает актуальности.

Математическое моделирование течения жидкости в водоемах осуществим с использованием модели идеальной стратифицированной жидкости. При существующей глубине прудов-отстойников плотность пренебрежимо мало отличается от среднего значения, поэтому классическая система уравнений для описания динамики стратифицированных течений сводится к решению одного уравнения Гельмгольца [7]:

$$\frac{\partial \psi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial y^2} = \mu^2 (y - \psi), \quad (1)$$

где  $\psi$  – функция тока, связанная с компонентами вектора

скорости жидкости ( $u, v$ ) соотношениями  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ ;

$\mu^2 = \frac{a}{fr^2}, a = \frac{\partial \rho}{\partial y}, Fr = \frac{u_0}{\sqrt{gL\Delta\rho/\rho_0}}$  – плотностное число Фруда

да,  $g$  – ускорение свободного падения,  $u_0$  – характерная скорость,  $L$  – характерная длина водоема,  $\rho$  – плотность,  $\Delta\rho$  – отклонение плотности от среднего значения  $\rho_0$ .

Для прудов-отстойников после цикла отстаивания разность в плотности жидкости у поверхности и возле дна за счет большей концентрации глинистых частиц у дна может составлять до 40 гр/м<sup>3</sup> при глубине водоема 30-50 м. Таким образом, можно ожидать наличие в водоемах различного рода вихревых течений. Плотностное число Фруда будет зависеть от конфигурации водоема, для рассматриваемой модели водоема глубиной 50 м и длиной 1400 м значение  $Fr = 0,000005$ , но даже при таких параметрах течение не будет ламинарным.

Рассмотрим три варианта водоемов, отличающиеся между собой расположением входных труб. В первом случае жидкость втекает по трубе, расположенной в верхней части водоема, – это моделирует ситуацию, когда жидкость просто закачивается в водоем по трубе, которая не имеет значительного заглубления и расположена у поверхности. Второй вариант – это расположение входной трубы в придонной ча-

сти водоема. Эта ситуация смоделирована исходя из предположения, что при наличии вихревых течений такая конфигурация труб повлияет на расположение вихрей и, следовательно, на процесс распространения примесей. Третий вариант – это закачивание в водоем жидкости через трубу, расположенную у входной стенки водоема и имеющую щелевое отверстие вдоль всей погруженной части трубы. Большая эффективность подобных отстойников для очистки от биологических примесей показана, например, в [6]. Поэтому представляется интересным исследовать гипотезу о большей эффективности такого метода заполнения водоема для прудов-отстойников для глинистых частиц, которые имеют гораздо большую линейную протяженность.

Для задачи в постановке через функцию тока можно поставить следующие граничные условия:

$\frac{\partial \psi}{\partial \bar{n}} = 0$  на тех границах, через которые нет течения жидкости;  
 $\frac{\partial \psi}{\partial \bar{n}} = u$ , где  $u = const$  – скорость течения жидкости через границу.

Решение осуществляется методом неполной аппроксимации минимальных невязок [8] с использованием сеточных уравнений на равномерной прямоугольной сетке.

В качестве второй модели мы рассматриваем модель двухкомпонентной (вода – примесь) неоднородной вязкой несжимаемой жидкости. Движение такой среды описывается нестационарной системой уравнений Навье-Стокса с переменной плотностью и вязкостью, а перенос примеси – уравнением конвективной диффузии. Вязкости и плотности среды определяются уравнениями, зависящими от концентрации компонент. В целом система принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d(\rho \bar{V})}{dt} = -\nabla p + \text{div}(\mu \mathbf{D}) + \rho \bar{f}, \\ \text{div} \bar{V} = 0, \\ \frac{dC_1}{dt} = D \Delta C_1, \\ C_2 = 1 - C_1, \\ \mu = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_2 C_1 + \mu_1 C_2}, \\ \rho = \rho_1 C_1 + \rho_2 C_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\bar{V}(\bar{x}, t) = (v_1, v_2, v_3)$  – вектор скорости среды в точке  $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$  и момент времени  $t$ ,  $\mu(\bar{x}, t)$  – динамическая вязкость,  $\rho(\bar{x}, t)$  – плотность,  $C_1(\bar{x}, t), C_2(\bar{x}, t)$  – объемные концентрации компонент с постоянными плотностями  $\rho_1, \rho_2$  и вязкостями  $\mu_1, \mu_2$ ,  $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3)$  – вектор массовых сил,  $p$  – давление,  $\mathbf{D}$  – тензор скоростей деформаций, компоненты которого равны  $\tau_{ij} = \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $D = const$  – коэффициент диффузии примеси в воде.

Для численного решения используется метод конечных разностей на прямоугольной неравномерной сетке с шахматным расположением узлов. Система уравнений Навье-Стокса (2) аппроксимируется схемой расще-

пления по физическим факторам с учетом переменной плотности, а для решения уравнений конвективной диффузии применяется схема предиктор-корректор. Подробное описание этого численного алгоритма представлено в статье [9]. Примеры применения модели к задачам размыва и переноса связного грунта в воде представлены в работах [10, 11].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

Рассматриваемые водоемы имеют глубину 50 м и протяженность 1400 м, что за счет диспропорции размеров создает определенные сложности при визуализации по-

лученных картин течения. Однако же в средней части водоема вихревые и линейные компоненты картины течения не меняются и остаются параллельными, картина течения имеет различия в начальной и конечных частях водоема (рис. 1, 2, 3).

Из анализа картин течения можно заметить, что форма вихрей возле входной части водоема различается, однако на отметке не более 60-80 м от входных труб характер течения стабилизируется, и далее по длине водоема профиль и ламинарной, и вихревой частей картин течения совпадает. Наложение расчета динамики концентрации взвешенных частиц на картину течения показывает, что раз-

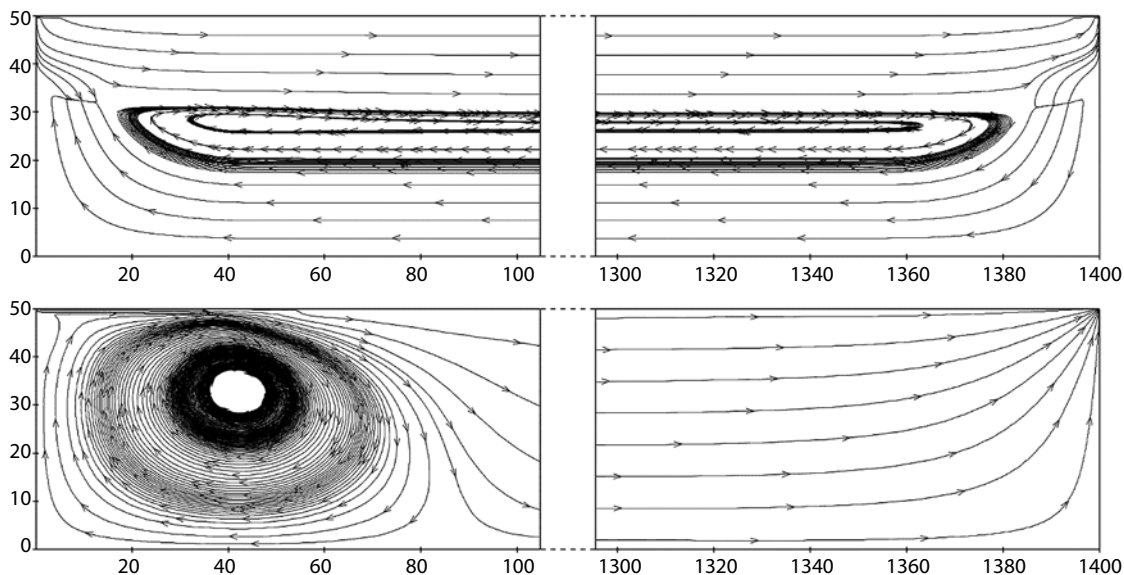


Рис. 1. Картина течения в отстойнике при расположении входной трубы в верхней части водоема, модель идеальной жидкости (сверху) и вязкой несжимаемой жидкости (снизу)

Fig. 1. Flow pattern in the tailings pond when the inlet pipe is located in the upper part of the pond, ideal fluid model (top) and viscous incompressible fluid model (bottom)

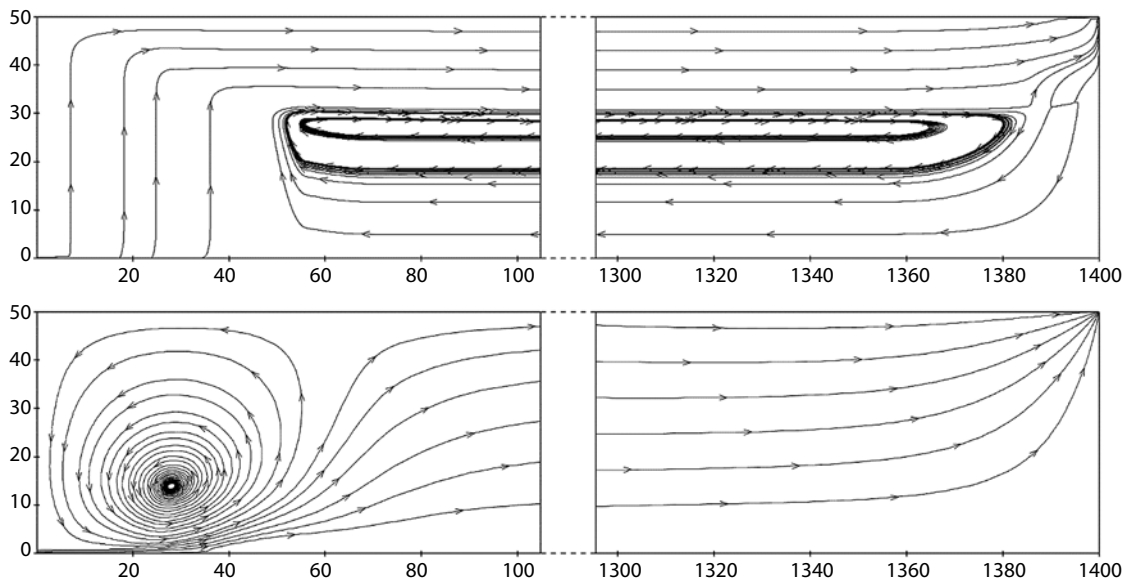


Рис. 2. Картина течения в отстойнике при расположении входной трубы в придонной области, модель идеальной жидкости (сверху) и вязкой несжимаемой жидкости (снизу)

Fig. 2. Flow pattern in the tailings pond when the inlet pipe is located in the bottom part of the pond, ideal fluid model (top) and viscous incompressible fluid model (bottom)

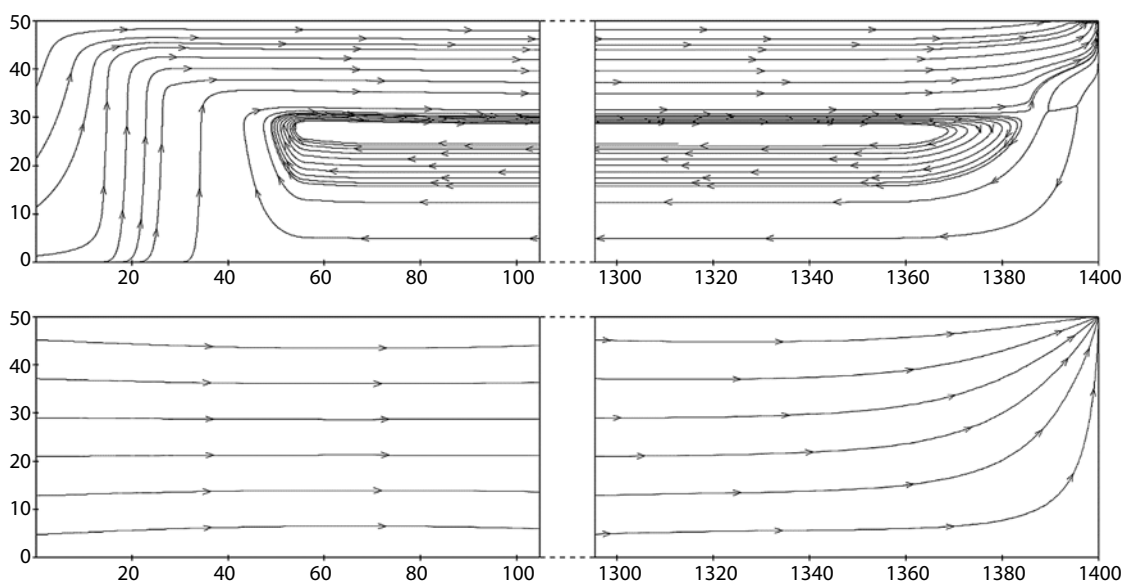


Рис. 3. Картина течения в отстойнике в случае использования трубы со щелевым отверстием на всей протяженности погруженного участка, модель идеальной жидкости (сверху) и вязкой несжимаемой жидкости (снизу)

Fig. 3. Flow pattern in the tailings pond when a slotted pipe is used throughout the submerged section, ideal fluid model (top) and viscous incompressible fluid model (bottom)

личие течений на такой малой части протяженности водоема не оказывает существенного влияния на механизм очистки сточных вод от взвешенных частиц. Определенные ограничения на интерпретацию результатов накладывает использование двумерной модели. Однако же существенное различие в глубине и длине водоема из имеющегося опыта [12] позволяет говорить о достаточно хорошем качестве двумерных моделей в подобных водоемах.

С точки зрения практического применения исследования можно говорить об оптимальном выборе размещения входных труб вблизи поверхности водоема, так как это технически наиболее простой вариант, и никакой другой вариант из исследованных не позволил получить лучших результатов функционирования очистного сооружения.

Лучшие результаты очистки при использовании щелевых отверстий в трубах или распределенной сети горизонтальных отводов от главной трубы для органических отходов по сравнению с очисткой сточных вод от взвешенных глинистых частиц могут быть объяснены не только различиями в пропорциях водоемов, но и физическими свойствами примесей – мелкодисперсные глинистые загрязнения имеют очень малую скорость оседания.

## Выводы

На основании исследований в работе зависимости эффективности работы прудов-отстойников для очистки сточных вод от взвешенных глинистых частиц установлено, что характер расположения входных труб несущественно влияет на течение и распространение примесей, картина течения отличается в начальной части водоема, что не оказывает существенного влияния на эффективность работы отстойника.

Из этого следует, что обосновано оптимальное размещение входных труб для закачки жидкости в верхней ча-

сти водоема, так как это является технически более простым решением.

Дополнительного исследования требует изучение других факторов, способных оказать влияние на течение и перенос примесей, например наличие источников грунтовых вод, осадков и других факторов.

## Список литературы

1. Green strategies in formulating, stabilizing and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review / D. Das, S.K. Das, P.K. Parhi et al. // Energy Nexus. 2021. Vol. 4. 30 December. 100025.
2. Provin T.L., Pitt J.L. Water Management: Clearing Cloudy and Muddy Water in Ponds and Lakes. Texas A&M Agrilife Extension article.
3. Automatic control of sewage treatment process using biological reaction (iSPEC 2021) / Z. Ruhua, Y. Niansheng, W. Yuqing et al. / 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Nanjing, China. 2021. P. 737-742. DOI: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735824.
4. Макридин Е.В., Тюленев М.А., Марков С.О. Экспериментальные исследования фильтрования карьерных сточных вод в крупнокусковых массивах из разрушенных горных пород в условиях разреза «Камышанский» // Техника и технология горного дела. 2020. № 2. С. 4-25.
5. Зиборов А.П., Бордий А.П., Денисенко А.И., Франчук В.П., Шломин А.Н. Разработка рациональной и экологически безопасной технологии очистки шламовых отстойников угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1996. № 1.
6. Пат. RU 107962 U1 Российская Федерация, МПК B01D 21/24 Горизонтальный отстойник / Голованчиков А.Б., Милова Д.А., Балашов В.А., Кузнецов Н.А., Чурикова В.И.; заявитель и патентообладатель – ВолгГТУ – № 2011109533/05; заявл. 14.03.2011; опубл. 2011.09.10.

7. Белолипецкий В.М., Шокин Ю.Н., Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: Издательство «ИНФОЛИО-пресс», 1997. 240 с.
8. Захаров Ю. Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики. Новосибирск: Наука, 2004. 240 с.
9. Zakharov Y., Zimin A., Ragulin V. Two-component incompressible fluid model for simulating surface wave propagation // *Communications in Computer and Information Science*. 2015. No 549. P.201-210.
10. Modeling cohesionless and cohesive soils erosion near oil platforms of gravity type / N.D. Belyaev, N.A. Geydarov, K.S. Ivanov et al. / International Conference «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov (SCP). St. Petersburg, Russia. IEEE, 2015. P. 5-8.
11. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil / Y.N. Zakharov, A.I. Zimin, I.S. Nudner et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. No. 1. P.012182.
12. Захаров Ю.Н., Потапов В.П., Счастливцев Е.Л., Чирюкина А.В., Моделирование распространения загрязняющих веществ в затопленных горных выработках // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № S18. С. 34-38.

## Original Paper

UDC 622.85:622.015 © A.V. Vylegzhanina, A.I. Zimin, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 12, pp. 80-84  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-80-84>

## Title

## COMPARISON OF FLOW PATTERNS IN TAILINGS PONDS OF DIFFERENT GEOMETRIES

## Authors

Vylegzhanina A.V.<sup>1</sup>, Zimin A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

## Authors Information

**Vylegzhanina A.V.**, PhD (Engineering), Associated Professor, Department of Digital Technologies, e-mail: [alina\\_com@rambler.ru](mailto:alina_com@rambler.ru)

**Zimin A.I.**, PhD (Physics and Mathematics), Associated Professor, Department of Digital Technologies, e-mail: [sliii@mail.ru](mailto:sliii@mail.ru)

## Abstract

Dirty wastewater from coal mining and processing enterprises requires treatment even to be used as process water and to be discharged into natural water bodies. One of the common treatment methods is water settling in special tailings ponds, which continuously receive contaminated water and from where the already treated water is pumped out to maintain the water level in the pond. This paper examines various configurations of the water injection system into the tailings ponds in order to study the flow patterns and their effect on the treatment result. It is found that the optimal location of the inlet pipes is near the surface of the pond. Complex vortex-type flows are formed in the ponds, and the configuration of the inlet pipes affects only a small extent of the tailings pond length.

## Keywords

Flow, Ideal fluid, Viscous incompressible fluid, Wastewater treatment, Fine impurities.

## References

1. Das D., Das S.K., Parhi P.K., Dand A.K., Mishra S. & Misra P.K. Green strategies in formulating, stabilizing and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review. *Energy Nexus*, 2021, Vol. 4, 30 December, 100025.
2. Provin T.L. & Pitt J.L. Water Management: Clearing Cloudy and Muddy Water in Ponds and Lakes. Texas A&M Agrilife Extension article.
3. Ruhua Z., Niansheng Y., Yuqing W., Dongliang X. & Jiahao S. Automatic control of sewage treatment process using biological reaction (ISPEC 2021), 2021. IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC), Nanjing, China, 2021, pp. 737-742. DOI: [10.1109/ISPEC53008.2021.9735824](https://doi.org/10.1109/ISPEC53008.2021.9735824).
4. Makridin E.V., Tyulenev M.A. & Markov S.O. Experimental studies of the in-pit run-off water filtration in lumpy masses of broken rocks in conditions of the Kamyschanskiy strip mine. *Tehnika i tehnologiya gornogo dela*, 2020, (2), pp. 4-25. (In Russ.).
5. Ziborov A.P., Bordiy A.P., Denisenko A.I., Franchuk V.P. & Shlomin A.N. Development of a rational and environmentally safe technology to clean tailings ponds of coal mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*, 1996, (1), 6. Golovanchikov A.B., Milova D.A., Balashov V.A., Kuznetsov N.A. & Churikova V.I. Horizontal settling tank. Pat. RU 107962 U1 Russian Federation, International Patent Classification: B01D 21/24, applicant and patentee: Volgograd State Technical University, Applic. No. 2011109533/05, claim 14.03.2011, publ. 10.09.2011.
6. Belolipetsky V.M. & Shokin Y.N. Mathematical modeling in environmental protection tasks. Novosibirsk, INFOLIO-press Publ., 1997, 240 p. (In Russ.).
7. Zakharov Yu.N. Gradient iterative methods for solving fluid dynamics problems. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004, 240 p. (In Russ.).
8. Zakharov Y., Zimin A. & Ragulin V. Two-component incompressible fluid model for simulating surface wave propagation. *Communications in Computer and Information Science*, 2015, (549), pp. 201-210.
9. Belyaev N.D., Geydarov N.A., Ivanov K.S., Lebedev V.V., Nudner I.S., Ragulin V.V., Zakharov Y.N. & Zimin A.I. Modeling cohesionless and cohesive soils erosion near oil platforms of gravity type. International Conference «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov (SCP). St. Petersburg, Russia, IEEE, 2015, pp. 5-8.
10. Zakharov Y.N., Zimin A.I., Nudner I.S. & Yashin M.E. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1441, (1), 012182.
11. Zakharov Yu.N., Potapov V.P., Schastlyvtsev E.L. & Chiryukina A.V. Modeling of pollutants distribution in flooded mine workings. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*, 2009, (S18), pp. 34-38. (In Russ.).

## Acknowledgements

The research was carried out as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022, Agreement No. 075-15-2022-1201 as of September 30, 2022.

## For citation

Vylegzhanina A.V. & Zimin A.I. Comparison of flow patterns in tailings ponds of different geometries. *Ugol'*, 2023, (12), pp. 80-84. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2023-12-80-84](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-80-84).

## Paper info

Received July 12, 2023

Reviewed November 10, 2023

Accepted November 27, 2023