

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: KGVYOU

УДК 662.75

Mathematical Modeling of Continuous Media Flow
in a Vortex Chamber

Aleksey V. Zyryanov^a, Vladimir D. Sarychev^a,
Vasily I. Murko^a and Viktor I. Karpenok^{*b}

^a*Siberian State Industrial University (SibGIU)*

^b*Kuzbass State Technical University
named after T. F. Gorbachev in Novokuznetsk
Novokuznetsk, Russian Federation*

Received 16.10.2024, received in revised form 22.11.2024, accepted 03.12.2024

Abstract. This article is devoted to the numerical modeling of the flow processes of pulverized water-coal fuel (WCF) in a vortex combustion chamber. WCF, consisting of fine coal particles, water, and special additives, is considered not only as a promising energy carrier capable of enhancing the efficiency and environmental performance of energy systems but also as a feedstock for coal gasification. The vortex method of fuel delivery ensures stable and complete combustion, reduces harmful emissions, and increases the efficiency of fuel-burning systems. Mathematical modeling of the vortex flow, based on the Navier-Stokes equations and the $k-\varepsilon$ turbulence model, enables the analysis of flow parameters, prediction of fuel behavior under various conditions, and optimization of the chamber design. The modeling conducted using COMSOL Multiphysics confirms the effectiveness of the proposed model for analyzing the gas-dynamic situation in a vortex chamber with tangential gas and fuel injection.

Keywords: water-coal fuel, vortex chamber, mathematical modeling, COMSOL Multiphysics, turbulence.

Acknowledgements. This research was conducted with the financial support of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Industrial University (SibSIU) as part of scientific research activities.

Citation: Zyryanov A. V., Sarychev V. D., Murko V. I., Karpenok V. I. Mathematical modeling of continuous media flow in a vortex chamber. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(8), 1090–1099. EDN: KGVYOU



Математическое моделирование течения сплошных сред в вихревой камере

А. В. Зырянов^а, В. Д. Сарычев^а,
В. И. Мурко^а, В. И. Карпенко^б

^аСибирский государственный
индустриальный университет (СибГИУ)

^бКузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева в г. Новокузнецке
Российская Федерация, Новокузнецк

Аннотация. Статья посвящена численному моделированию процессов течения распыленного водоугольного топлива (ВУТ) в вихревой камере сгорания. ВУТ, состоящее из тонких угольных частиц, воды и специальных добавок, рассматривается не только как перспективный энергоноситель, способный повысить экономичность и экологичность энергетических комплексов, но и как исходный продукт для газификации угля. Вихревой способ подачи топлива обеспечивает стабильное и полное сгорание, способствует снижению выбросов вредных веществ и повышает КПД топливосжигающих установок. Математическое моделирование вихревого потока, реализованное на основе уравнений Навье-Стокса и модели турбулентности $k-\epsilon$, позволяет анализировать параметры течения, предсказывать поведение топлива при различных условиях и оптимизировать конструкцию камеры. Проведенное моделирование на базе COMSOL Multiphysics подтверждает эффективность предложенной модели для анализа газодинамической ситуации в вихревой камере с тангенциальной подачей газа и топлива.

Ключевые слова: водоугольное топливо, вихревая камера, математическое моделирование, COMSOL Multiphysics, турбулентность.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ) в рамках выполнения научно-исследовательской работы.

Цитирование: Зырянов А. В. Математическое моделирование течения сплошных сред в вихревой камере / А. В. Зырянов, В. Д. Сарычев, В. И. Мурко, В. И. Карпенко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(8). С. 1090–1099. EDN: KGVYOU

Введение

Водоугольное топливо представляет собой перспективный энергоноситель, состоящий из угольных частиц, воды и специальных добавок, который рассматривается не только как альтернатива традиционным видам топлива, таким как уголь, нефтяное топливо и газ, но и служит исходным продуктом для газификации угля. Одним из ключевых направлений развития энергетики является повышение её экологичности и экономичности. В этом контексте сжигание водоугольного топлива в вихревой топке представляет особый интерес, поскольку такая технология позволяет более эффективно использовать уголь, снижая выбросы вредных веществ в окружающую среду и увеличивая КПД топливосжигающих установок. Основные идеи горения ВУТ изложены в работах Делягина [1–3]. Технологии сжигания и газификации ВУТ широко используются в Китае [4].

Перспективным направлением является использование технологии низкотемпературного вихревого сжигания забалластированных водой и минеральными компонентами некондици-

онных топлив. При использовании данной технологии для сжигания ВУТ имеются проблемы, сдерживающие ее практическое применение. В первую очередь это недостаточность теоретических данных по оценке влияния основных характеристик ВУТ (выхода летучих веществ, влажности, зольности и, соответственно, низшей теплоты сгорания топлива) на процессы воспламенения и горения, отсутствие научно обоснованных методических рекомендаций по выбору конструктивных параметров вихревых адиабатических топков (внутренние размеры и диаметр пережимного окна) для надежного сжигания топлива в зависимости от теплопроизводительности теплогенераторов малой и средней мощности, в том числе при переводе мазутных, газовых и угольных котлов со слоевыми топками на сжигание ВУТ [5–11]. Опубликовано много работ, в которых приводятся результаты расчетов физико-химических процессов на фоне сложных турбулентных гидродинамических течений [12–19].

Численное моделирование течения газа и горения частиц в вихревой камере проводилось в работах [20–23]. В расчетах использовались инжекторы сжатого воздуха и топлива, расположенные на уровне нижних воздухозаборников. Геометрически воздухозаборники и топливные инжекторы расположены попарно на противоположных вершинах вписанного прямоугольника. Расчет газодинамических процессов в камере выполнялся с помощью программы STAR-CCM+ (версия 6.02), разработанной CD-adapco.

Для описания газового потока использовались модели Эйлера. Симуляция частиц топлива проводилась по лагранжевой фазе. В расчетах использованы нестационарные численные модели на основе осреднения по Рейнольдсу (RANS). Применялась k - ϵ турбулентная модель. Задача решалась в трехмерной постановке. Для численных расчетов использовался метод конечных объемов. В результате расчетов показано, что в середине камеры формируется осевой поток вдоль вертикальной оси, что обусловлено разницей давлений на выходе. Конфигурация потоков от сопел сохраняется в данном сечении, а под сводом камеры образуются области повышенных скоростей. Предполагается, что наличие последовательных тороидальных вихрей увеличивает время пребывания частиц топлива в зоне реакции. Согласно приведенным данным, поток в вихревой камере можно разделить на две зоны. В первой зоне ($0 < r < R$) поток аналогичен потоку Куэтта-Пуазейля с вращающимся цилиндром, имеющим угловую скорость Ω , радиус R и средний перепад давления в верхней и нижней частях цилиндрической камеры. Во второй зоне, прилегающей к краю цилиндра, формируется сложный поток из-за взаимодействия двух струй и пограничных слоев. Таким образом, выявлен сложный характер течения в вихревой камере с тангенциальным вдувом, что требует продолжения исследований газодинамического течения как основы для дальнейшего установления влияния процессов горения на структуру потоков. С учетом того, что в пакете STAR-CCM используется метод конечных объемов, а в пакете COMSOL Multiphysics метод конечных элементов, выбор параметров расчета искусственной вязкости для получения устойчивого решения нельзя переносить автоматически. Кроме того, лицензия STAR-CCM действует ограниченное время, а лицензия COMSOL Multiphysics бессрочная.

Поэтому целью исследования явилось создание проекта в COMSOL Multiphysics течения сплошной среды в вихревой камере. При этом задавались параметры среды и геометрические характеристики вихревой камеры, включая плотность, вязкость, скорости потоков и температуру. Граничные условия на стенках камеры и параметры потоков на входе и вы-

ходе устанавливались для обеспечения корректного математического описания процессов. Был выбран и реализован оптимальный численный метод, обеспечивающий стабильность и точность решений.

Математическая постановка задачи

В расчетах применялись нестационарные, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с $k - \epsilon$ моделью турбулентности для идеального газа. Такие уравнения использовались для моделирования различных трехмерных газодинамических течений в многих работах. В декартовой системе координат нестационарное течение вязкого сжимаемого газа относительно фильтрованных переменных описывается системой уравнений в дивергентном виде:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial P_1}{\partial x_1} + \frac{\partial P_2}{\partial x_2} + \frac{\partial P_3}{\partial x_3} = 0. \quad (1)$$

Система (1) дополняется уравнением состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1)\rho(e - 0,5(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)). \quad (2)$$

Компоненты векторов системы (1) определяются по формулам:

$$R = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho e \end{pmatrix}; \quad P_i = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \pi_{i1} \\ \pi_{i2} \\ \pi_{i3} \\ \rho h - u_k \tau_{ik} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\pi_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} p, \quad h = e + p / \rho \quad (4)$$

Компоненты тензора вязких напряжений и координаты вектора теплового потока находятся из соотношений:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \quad (5)$$

где t – время, с; ρ – плотность, кг/м³; u_1, u_2, u_3 – компоненты вектора скорости в направлениях x_1, x_2, x_3 , м/с; p – давление, Па; γ – отношение удельных теплоемкостей; μ – эффективные значения вязкости и теплопроводности, Па·с, Вт/(К·м).

Уравнения (1) формально совпадают с уравнениями Навье-Стокса с эффективными вязкостью и теплопроводностью, вычисляемым по формуле:

$$\mu = \mu_m + \mu_t, \quad (6)$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К; μ_t – турбулентная вязкость, Па·с; $Pr = 0,72$; $Pr_t = 0,8$ – числа Прандтля для воздуха.

Рейнольдсовы напряжения выражаются через скорости деформации, выраженные через фильтрованные скорости:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij}. \quad (7)$$

Система уравнений (1–7) – является осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS). Эту систему уравнений обычно дополняют моделью эмпирической турбулентности

В стандартной $k - \varepsilon$ модели используются уравнения переноса турбулентной кинетической энергии k и диссипации энергии ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \\ = \mu_t \left(P + P_B + P_{NL} - \frac{2}{3} (\text{div} \vec{V})^2 \right) - \rho \left(\varepsilon + \frac{2}{3} k \text{div} \vec{V} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \\ = \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} \left(P + P_{NL} - \frac{2}{3} (\text{div} \vec{V})^2 \right) + C_{\varepsilon 3} P_B \right) - \rho \varepsilon \left(C_{\varepsilon 2} + \frac{2}{3} C_{\varepsilon 4} k \text{div} \vec{V} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left(P - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\rho k}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad (10)$$

Для нахождения турбулентной вязкости используется формула:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (11)$$

где f_μ – эмпирическая функция. Константы модели имеют следующие значения:

$$C_\mu = 0,09; c_{\varepsilon 1} = 1,44; c_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3. \quad (12)$$

Таким образом, задача (1–12) является полностью замкнутой, то есть число уравнений совпадает с числом неизвестных функций.

Результаты расчетов

Была создана трёхмерная модель вихревой камеры в COMSOL Multiphysics. Геометрия включает цилиндрическую камеру с входным и выходным отверстиями. Патрубки с входными отверстиями расположены тангенциально на боковой стенке камеры. Патрубок с выходным отверстием расположен на торцевой верхней поверхности камеры (рис. 1).

Для всей области модели была построена сетка, использующая тетраэдрические элементы, с учётом особенностей геометрии и областей с высокими градиентами (рис. 2).

В качестве физической модели был выбран интерфейс Turbulent Flow, $k-\varepsilon$ для описания турбулентного потока внутри камеры. На входе камеры задаётся граничное условие Inlet с определённой скоростью потока. На выходе камеры установлено условие Outlet с нулевым давлением. Для стенок камеры использовано условие Wall с параметром No Slip, чтобы смоделировать торможение потока на границах.

Для вычисления устойчивого состояния потока в вихревой камере был использован Stationary решатель. Решение было получено после корректировки начальных условий и параметров расчета, обеспечивающих устойчивость процесса.

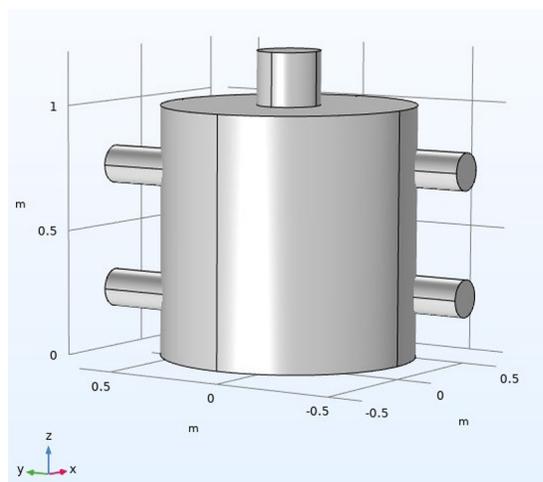


Рис. 1. Геометрия вихревой камеры

Fig. 1. Geometry of the vortex chamber

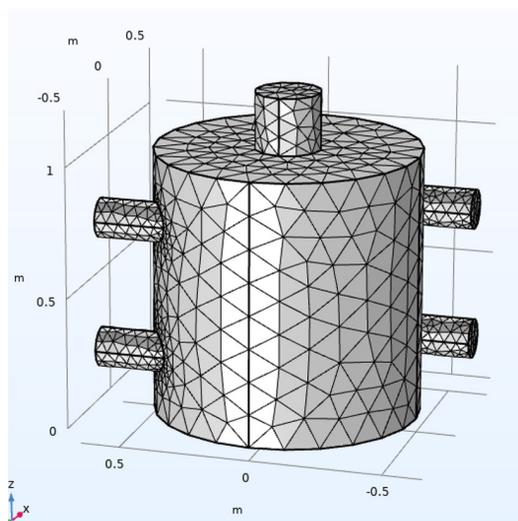


Рис. 2. Сетка вихревой камеры

Fig. 2. Mesh of the vortex chamber

Для анализа течения были построены Streamlines (линии тока), которые визуализируют траектории частиц внутри камеры (рис. 3).

Также был построен график Velocity Magnitude на сечении $z=\text{const}$, показывающий распределение скоростей в вихревой камере (рис. 4).

Дополнительно создан Velocity Slice по тому же сечению z , чтобы получить визуализацию слоя скорости и увидеть более детальную структуру потока (рис. 5).

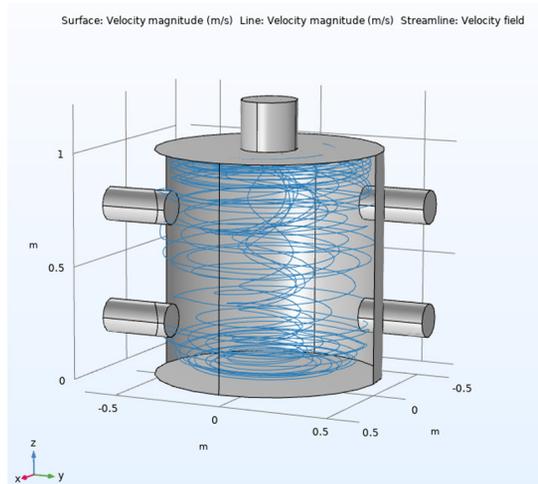


Рис. 3. Линии тока внутри камеры

Fig. 3. Streamlines inside the chamber

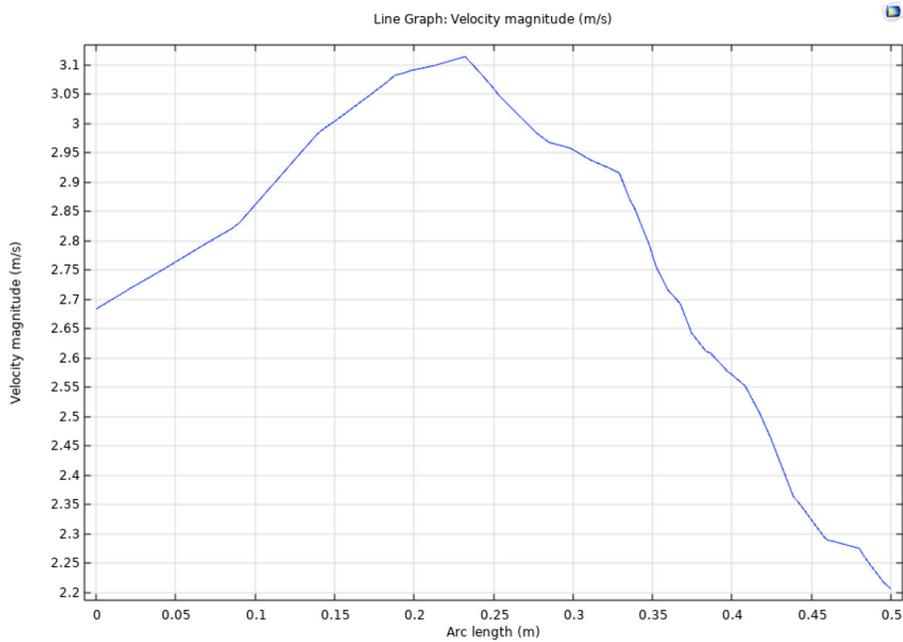


Рис. 4. График распределения скоростей в вихревой камере

Fig. 4. Velocity distribution plot in the vortex chamber

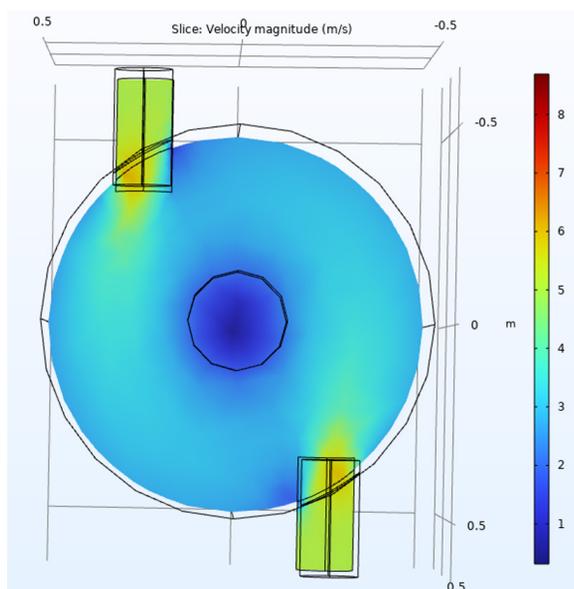


Рис. 5. Визуализация слоя скорости

Fig. 5. Velocity layer visualization

Заключение

Проведенные численные расчеты и моделирование подтвердили работоспособность и эффективность предложенной модели вихревой камеры для сжигания ВУТ. В рамках исследования была построена трехмерная модель камеры с использованием интерфейса Turbulent Flow k- ϵ , позволившая качественно описать динамику турбулентного потока внутри камеры.

Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics позволило задать детализированную расчетную сетку, адаптированную к геометрическим особенностям камеры, и использовать методы, оптимально подходящие для задач такого типа. Турбулентная модель k- ϵ , примененная в данном исследовании, продемонстрировала высокую точность предсказания газодинамических характеристик, включая распределение осевой скорости и вихревых структур, подтверждая ее применимость для высокоскоростных, турбулентных течений.

Таким образом, разработанная модель вихревой камеры для сжигания ВУТ представляет собой надежный инструмент для анализа и проектирования энергоэффективных установок.

Список литературы / References

[1] Делягин Г.Н. *Сжигание высоко обводнённого топлива в виде водоугольных суспензий*: сборник, М.: Наука, 1966. 45–55. [Delyagin G.N. *Combustion of highly watered fuel in the form of coal-water slurries*: collection, Moscow. Nauka, 1966. 45–55. (In Rus.)]

[2] Делягин Г.Н. *Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии*, М.: Наука, 1967. 55–66. [Delyagin G.N. *On the conditions for the simultaneous processes of water evaporation and combustion of a coal-water slurry drop*, Moscow. Nauka, 1967. 55–66. (In Rus.)]

[3] Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н. *Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения*, М.: Наука, 1965. 126–140. [Delyagin G.N., Smetannikov B.N. *New methods of fuel combustion and issues of combustion theory*, Moscow. Nauka, 1965. 126–140. (In Rus.)]

[4] Мурко В.И., Яо Лиминь, Цзя Чжэ Перспективы и возможности создания углехимического производства в Кузбассе с учетом опыта Китая. *Международная научно-практическая конференция «Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего» в 4 т. Т. 1*. Под ред. Академика Российской академии наук С.М. Алдошина: М.: 2024. 243–248. 1883. (ISBN 978–5–6052058–1–4) [Murko V.I., Yao Limin, Jia Zhe Prospects and possibilities of creating a coal chemical production in Kuzbass, taking into account the experience of China. *International scientific and practical conference “Development of the productive forces of Kuzbass: history, modern experience, strategy of the future” in 4 vols. Vol. 1*. Ed. Academician of the Russian Academy of Sciences S.M. Aldoshina: Moscow. 2024. 243–248. 1883. (ISBN 978–5–6052058–1–4) (In Rus.)]

[5] Мурко В.И., Хямяляйнен В.А., Волков М.А., Баранова М.П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172 [Murko V.I., Khyamyalyainen V.A., Volkov M.A., Baranova M.P. The opportunities and prospects for the implementation of non-waste coal preparation technology, *Journal Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2019, 6, 165–172 (In Rus.)]

[6] M. Alaa Musalam and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel (CWF). *International Journal of Energy and Environmental Research*, 2016, 4(3), 27–36.

[7] Baranova M.P., Qian Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagin V.A., Likhachev D. Utilization slurry coal-water fuel. *Journal Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2014, 7(4), 474–480 (In Rus.)

[8] Patent No. 2145038. M.cl. F 23 Q 5/00. Method of Combustion and Combustion Stabilization of the Water-Coal Fuel in the Settling Chamber (In Rus.). – No. 97120914/06.

[9] Murko V, Karpenok V, Fedyayev V, Chernykh D Results of tests of a fuel additive on a coal-fired boiler, *Journal of SFU*, 2017, 10(8), 474–480 (In Rus.)

[10] Murko V.I., Khyamyalyainen V.A. and Baranova M.P. The Creation of a Low-Capacity Boiler Plant on Coal-Enrichment Waste, 2019, *International Science and Technology Conference “EastConf”*, Vladivostok, Russia, 2019, 1–4. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725397

[11] Murko V., Baranova M., Grishina I. The intensification of the solid fuel grate-firing process. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1261, 2019, 012024

[12] Белов И.А., Исаев С.А. *Моделирование турбулентных течений*. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108. [Belov I.A., Isaev S.A. *Modeling of turbulent flows*. St. Petersburg: Balt. State Tech. Univ., 2001. 108. (In Rus.)]

[13] Липанов А.М., Кисаров Ю.Ф., Ключников И.Г. *Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков*. Екатеринбург: УрРАН, 2001. 160. [Lipanov A.M., Kisarov Yu.F., Klyuchnikov I.G. *Numerical experiment in classical hydromechanics of turbulent flows*. Yekaterinburg: Ural RAS, 2001. 160. (In Rus.)]

[14] Волков К.Н., Емельянов В.Н. *Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений*. М.: Физматлит, 2008. 368. [Volkov K.N., Emelyanov V.N. *Modeling of large vortices in turbulent flow calculations*. Moscow. Fizmatlit, 2008. 368. (In Rus.)]

[15] Ахметов В.К., Шкадов В.Я. *Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений*. М.: Издательство АСВ, 2009. 176. [Akhmetov V.K.,

Shkadov V. Ya. *Numerical simulation of viscous vortex flows for technical applications*. Moscow. ASV Publishing, 2009. 176. (In Rus.)]

[16] Митрофанова О.В. *Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок*. М.: Физматлит, 2010. 288. [Mitrofanova O.V. *Hydrodynamic s and heat exchange of twisted flows in channels of nuclear power installations*. Moscow. Fizmatlit, 2010. 288. (In Rus.)]

[17] Юн А.А. *Теория и практика турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений*. М.: URSS, 2009. 272. [Yun A.A. *Theory and practice of turbulent flows with heat exchange, mixing, chemical reactions, and two-phase flows*. Moscow. URSS, 2009. 272. (In Rus.)]

[18] Бубенчиков А. М., Старченко А. В. *Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах*. Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 1998. 236. [Bubenchikov A.M., Starchenko A. V. *Numerical models of dynamics and combustion of aerodisperse mixtures in channels*. Tomsk: Tomsk State University Press, 1998. 236. (In Rus.)]

[19] Бутырев А. Е., Галанин М. П., Гнеденко В. Г. *Математическое моделирование течения газа в вихревых камерах с тангенциальным вдувом*. Препринт Института прикладной математики, 2007, 85, 27. [Butyrev A.E., Galanin M.P., Gnedenko V.G. *Mathematical modeling of gas flow in vortex chambers with tangential injection*. Preprint of the Institute of Applied Mathematics, 2007, 85, 27. (In Rus.)]

[20] Сарычев В. Д., Куксов И. А., Мочалов С. П., Шендриков А. Е. *Математическое моделирование газодинамических течений в вихревой камере*. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2012, 8, 39–42. [Sarychev V.D., Kuksov I.A., Mochalov S.P., Shendrikov A.E. *Mathematical modeling of gas-dynamic flows in a vortex chamber*. *Proceedings of Higher Educational Institutions*. Black Metallurgy, 2012, 8, 39–42. (In Rus.)]

[21] Куксов И. А., Мочалов С. П., Сарычев В. Д., Шендриков А. Е. Численное моделирование процессов горения водоугольного топлива. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2012, 5(93), 44–48. [Kuksov I.A., Mochalov S.P., Sarychev V.D., Shendrikov A. E. Numerical modeling of coal-water fuel combustion processes. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2012, 5(93), 44–48. (In Rus.)]

[22] Куксов И. А., Сарычев В. Д., Мочалов С. П., Карпенко В. И. Исследование закрученного потока газа в цилиндрической камере на основе численного моделирования в Star cmm+. *Вестник Кемеровского государственного университета*, 2012, 4–2(52), 53–57. [Kuksov I.A., Sarychev V.D., Mochalov S.P., Karpenko V.I. Investigation of a twisted gas flow in a cylindrical chamber based on numerical simulation in Star cmm+. *Bulletin of Kemerovo State University*, 2012, 4–2(52), 53–57. (In Rus.)]

[23] Kuksov I.A., Mochalov S.P., Sarychev V.D. Swirl combustion chamber designed for fuel based on coal enrichment wastes. *World Applied Sciences Journal*, 2012, 9, 00–05.