

УДК 004.65

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ СХОДИМОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ГОРЕЛКЕ ГМ-10

Е. С. Павлов¹, А. Е. Кишалов²

¹egorpavlov98@mail.ru, ²kishalov@ufanet.ru

^{1,2} ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 17.01.2023

Аннотация. Рассмотрены проблемы 3D численного моделирования процессов горения на примере горелки ГМ-10. Исследовано влияние параметров сетки на результаты моделирования. Приведены основные характеристики горелки ГМ-10, построена её 3D модель с дополнительной выходной областью. Построены различные варианты сетки с различным количеством элементов. Произведено моделирование процесса горения природного газа в горелке ГМ-10. Получены поля различных параметров. Сделаны выводы по результатам моделирования. Рассмотрены дальнейшие возможности использования модели.

Ключевые слова: численное моделирование; горелка ГМ-10; горение; природный газ; метан; сеточное исследование; сеточная сходимость.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большая часть производимой в мире электроэнергии вырабатывается на ТЭЦ. В основе термического цикла подавляющего большинства ТЭЦ лежит цикл Ренкина, основными процессами которого являются: передача теплоты сгорания топлива к теплоносителю в котельной установке и расширение теплоносителя в паровой турбине. Экономичность ТЭЦ определяется в основном двумя показателями: удельным расходом условного топлива на производство единицы теплоты (b_T) и единицы электроэнергии ($b_{Э}$); чем ниже значение этих показателей, тем эффективнее и экономичнее работает ТЭЦ [1]. Сжигание топлива на ТЭЦ происходит в топочных устройствах паровых котлов, основным элементом топочных устройств являются горелки. Горелки разделяются на прямоточные и вихревые. Вихревые горелки получили большее применение при сжигании топлив с малым выходом летучих веществ. Также вихревые горелки обеспечивают интенсивное перемешивание потоков и более глубокое выгорание топлива [2]. От работы и размещения горелок зависит интенсивность воспламенения, полнота сгорания, тепловая мощность и эффективность топочного устройства. Таким образом, эффективность работы парового котла также зависит от эффективности работы горелок.

Горелка ГМ-10 предназначена для раздельного сжигания топочного мазута и природного газа. Горелка состоит из паромеханической форсунки, газовой части, лопаточного завихрителя воздуха и опоры. Газовая часть представляет собой устройство, состоящее из газового кольцевого коллектора с газывыводящими отверстиями и подводящей трубы. Лопаточный завихритель воздушного потока состоит из профильных лопаток, внутренней и внешней обечайки.

Горелки используются вместе с паровыми газомазутными котлами типа ГМ, а также с водогрейными котлами на базе паровых котлов ДЕ-ГМ. Горелку ГМ-10 устанавливают на котлы

ДЕ-16-14ГМ-О и ДЕВ-16-14ГМ-О. В таблице 1 приведены основные характеристики горелки ГМ-10 при работе на газовом топливе [3].

Таблица 1

Характеристики горелки

Наименование показателя	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт (Гкал/ч)	11,63 (10,02)
Потери полного напора в горелке при номинальной тепловой мощности, Па (мм. вод ст.)	1100 (110)
Номинальное давление газа перед горелкой, кПа (кгс/м ²)	25±6 (2500±6000)
Коэффициент избытка воздуха	
- при сжигании газа	1,05
- при сжигании мазута	1,15
Номинальное разрежение в камере сгорания, Па (кг/м ²)	20±20 (2±2)
Номинальная температура воздуха, °С	25±15
Температура газа перед горелкой, °С	0–30
Номинальный расход газа, нм ³ /ч	1182

Для моделирования процесса горения природного газа в горелке ГМ-10 была построена её 3D модель в пакете Autodesk Inventor 2019 (рисунок 1) [4].

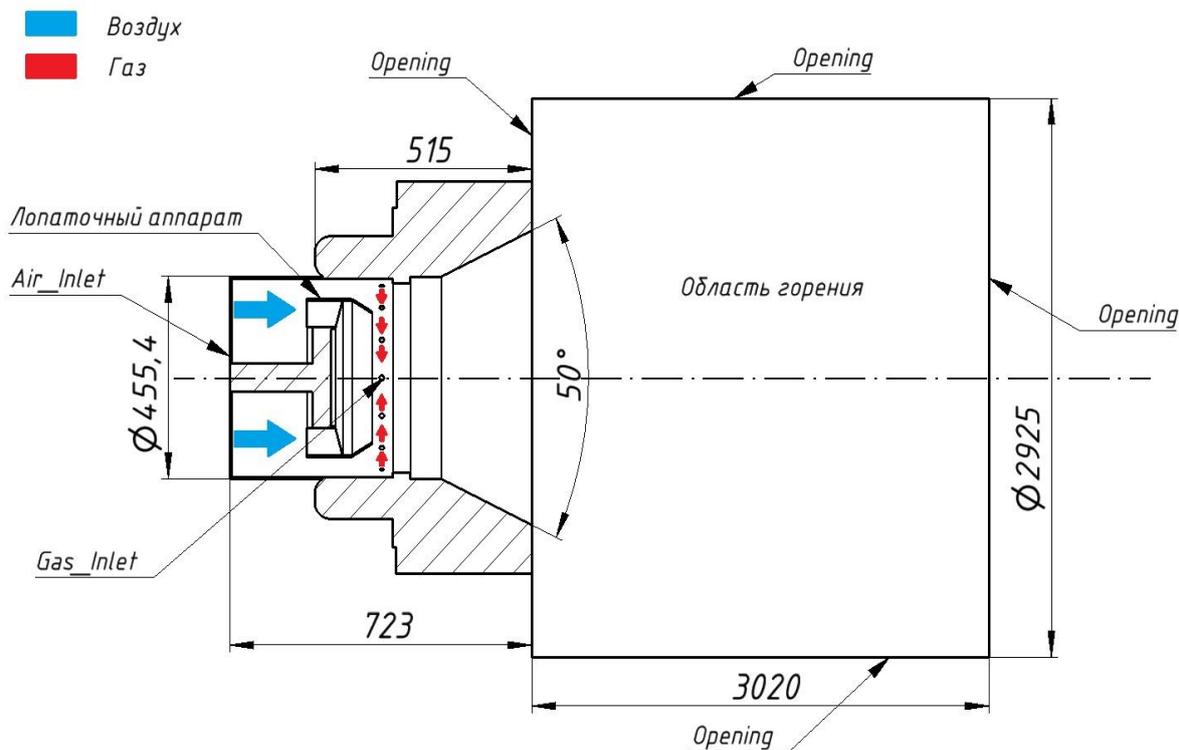


Рис. 1. Схема расчётной области с граничными условиями

Модель горелки была упрощена, были удалены конструктивные элементы, не оказывающие значительного влияния на процесс горения, либо влияющие незначительно. Не моделировались: мазутная часть горелки, патрубки для фотодатчиков, запальника и гляделки. Газовый коллектор выполнен монолитным, т.к. принято, что движение газа внутри коллектора не влияет на процесс горения. Для моделирования газывыводящих отверстий на внутренней поверхности газового коллектора были выделены специальные участки в количестве 16 штук диаметром 11,7 мм. Профилированные лопатки лопаточного аппарата были заменены прямыми, угол установки лопатки был принят равным 45°.

В качестве выходной области, в которой распространяется факел, был построен цилиндр высотой в 3,02 м и диаметром основания 2,925 м (рисунок 1).

Для исследования влияния параметров сетки на результаты моделирования была построена неструктурированная тетраэдрическая сетка в нескольких вариациях. Также были добавлены замечания в зоне лопаточного завихрителя, в зоне подвода воздуха, в зоне перемешивания потоков и в зоне горения [5]. Дополнительно на стенках элементов горелки была добавлена инфляция – структурированные слои из призматических элементов [6]. Параметры построенных сеток приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики построенных сеток

Наименование параметра	Название сетки			
	4 млн.	6 млн.	8 млн.	10 млн.
Количество элементов, шт	4050195	6067483	8196354	10306081
Количество узлов, шт	832512	1094217	1582603	1966237
Размер элемента в области горения, мм	25	25	17	15
Размер элемента на лопаточном завихрителе воздуха, мм	8	6	5	5
Размер элемента в зоне перемешивания потоков, мм	15	15	11	10
Размер элемента в зоне подвода воздуха, мм	15	10	11	10
Максимальный размер элемента, мм	50	70	60	50
Минимальный размер элемента, мм	0,5			

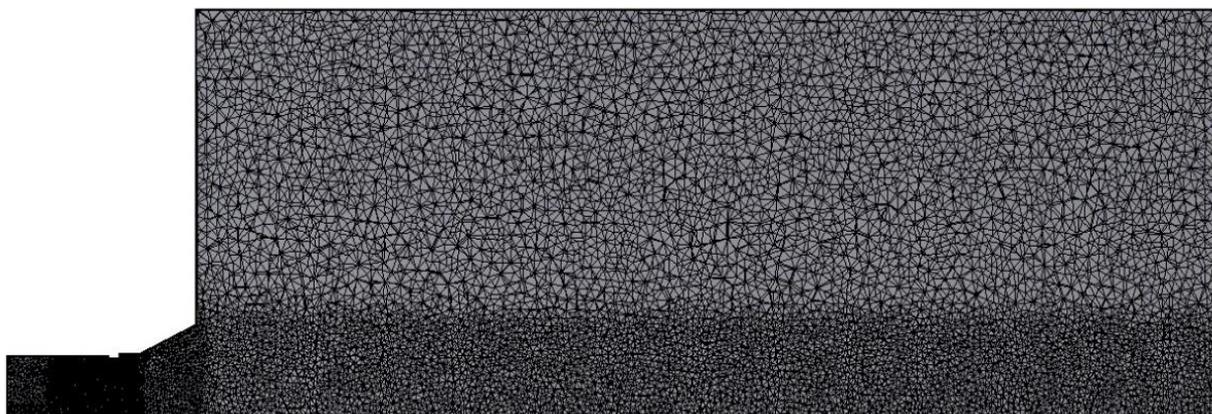


Рис. 2. Построенная сетка на 4 млн. элементов (разрез).

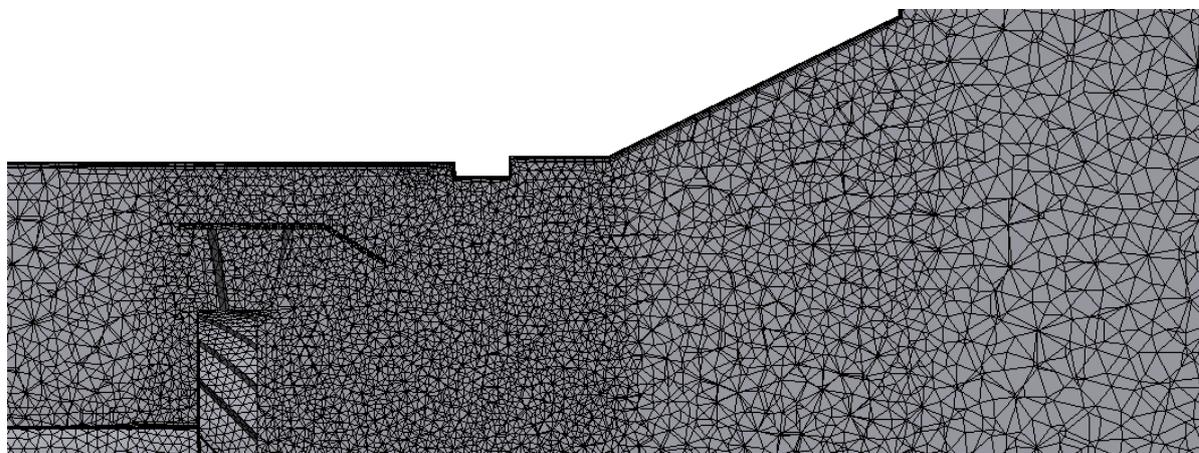


Рис. 3. Построенная сетка на 4 млн. элементов в зонах подвода воздуха, завихрителя и перемешивания потоков.

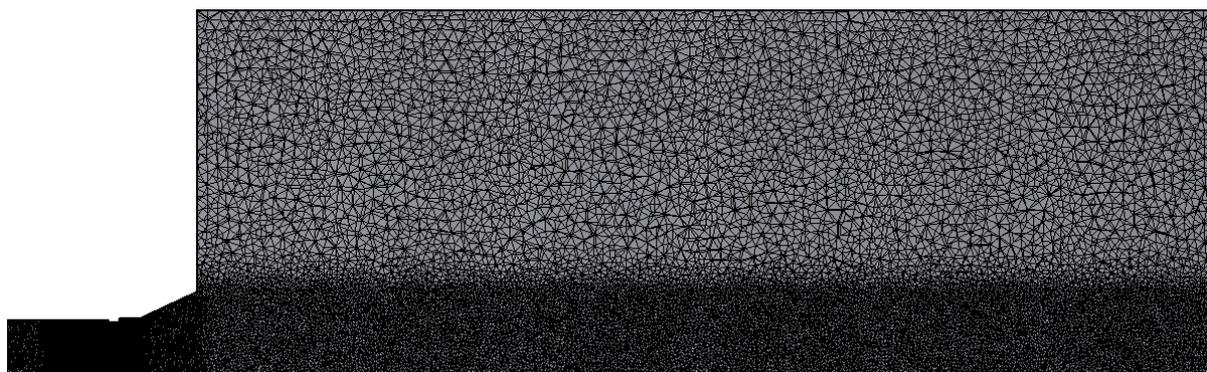


Рис. 4. Построенная сетка на 10 млн. элементов (разрез).

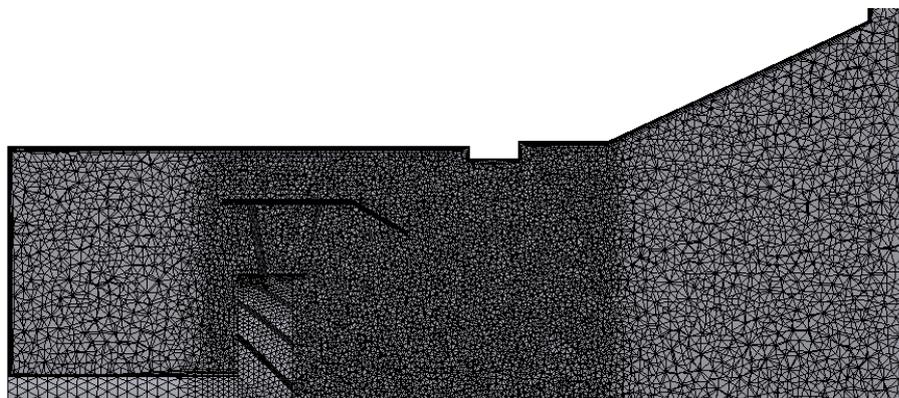


Рис. 5. Построенная сетка на 10 млн. элементов в зонах подвода воздуха, завихрителя и перемешивания потоков.

Природный газ, используемый в горелке ГМ-10, соответствует ГОСТ 5542-87, согласно которому содержание сероводорода не должно превышать $0,02 \text{ г/м}^3$, содержание меркаптановой серы – не более $0,036 \text{ г/м}^3$, объемная доля кислорода – не более 1% [7]. В большинстве случаев природный газ состоит на 92–98% из метана в зависимости от месторождения. В данном исследовании для экономии вычислительных ресурсов содержанием примесей в природном газе пренебрегаем и будем считать, что природный газ на 100% состоит из метана.

Реакция горения природного газа в воздухе в данной статье описывается схемой $2S\text{-}CM2\text{-}JB1$ – глобальная двухшаговая реакция горения метана [8].

В таблице 2 приведены значения констант в уравнении Аррениуса в зависимости от шага реакции [9]. Данная реакция задается в *Ansys*, как *Multi step*.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения Аррениуса		
Реакция	A	$E_{a1}, \text{ кал/моль}$
$CH_4 + 1,5O_2 \Rightarrow CO + 2H_2O$	$2 \cdot 10^{15}$	35000
$CO + 0,5O_2 \Rightarrow CO_2$	$2 \cdot 10^9$	12000

Оксиды азота образующиеся в процессе горения природного газа в данном исследовании не моделируются, однако для расчета количества воздуха, необходимого для сгорания 1 м^3 метана, и для расчета концентрации продуктов сгорания присутствие азота в воздухе необходимо учитывать, так как он влияет на порядок реакций и их некоторые константы. Состав воздуха принят: азот – 79%, кислород – 21% по объему (76,7% и 23,3% по массе) [10].

В качестве модели горения была выбрана модель *Eddy dissipation model (EDM)*, которая основана на предположении, что химические реакции быстры и время реакции ограничивается временем перемешивания компонентов, которое определяется отношением энергии диссипации к кинетической энергии [11].

В качестве модели турбулентности выбирается k - ϵ модель, т.к. данная модель достаточно универсальная и не такая требовательная к ресурсам компьютера, как другие модели турбулентности. Однако данная модель не способна с достаточной точностью описать пристеночные течения [12]. Но в нашем случае влияние взаимодействия потока со стенками не велико, т.к. основные процессы перемешивания и горения происходят вдали от стенок. Модель передачи тепла была выбрана – *Total Energy*. Лучистый теплообмен не учитывался, что может привести к завышенному значению температуры в зоне горения при моделировании.

На граничном условии *Gas_Inlet* (см. рис. 1) задается номинальный расход газа 0,2353 кг/с, а также температура газа – 30 К (табл. 1).

На граничном условии *Air_Inlet* задается расход воздуха – 4,139 кг/с, температура воздуха – 30 К и массовые доли компонентов согласно принятому составу воздуха.

На выходных границах задается ГУ – *Opening*, на котором задается отрицательное избыточное давление – минус 20 Па. Ссылочное давление составляло 1 атм.

Далее проводился расчет в *ANSYS Solver*, шаг по времени был выбран равным $2 \cdot 10^{-4}$ с. Расчет заканчивался при достижении сходимости уравнений не более 10^{-4} . Результаты расчета представлены на рисунках 6–14.

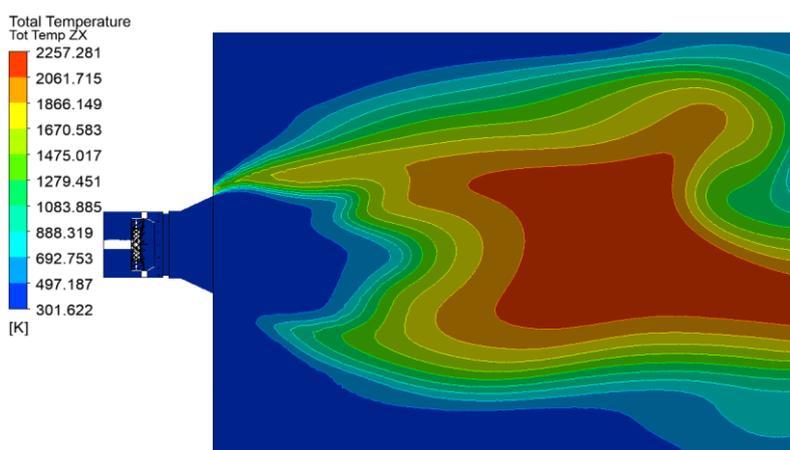


Рис. 6. Поле полной температуры при 4 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

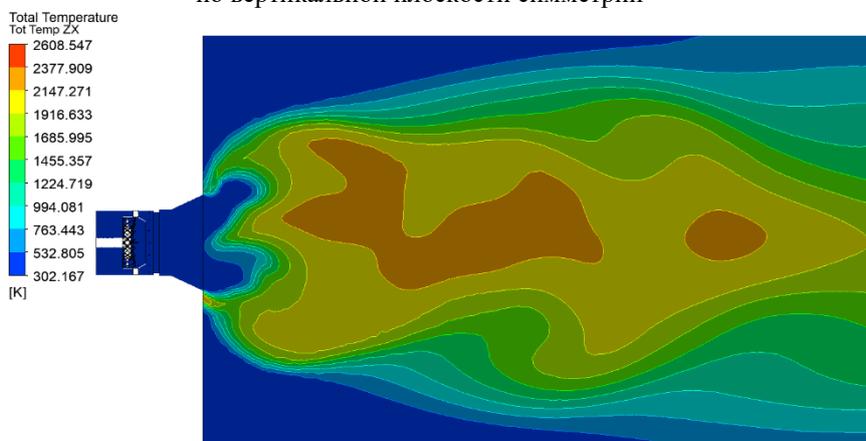


Рис. 7. Поле полной температуры при 6 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

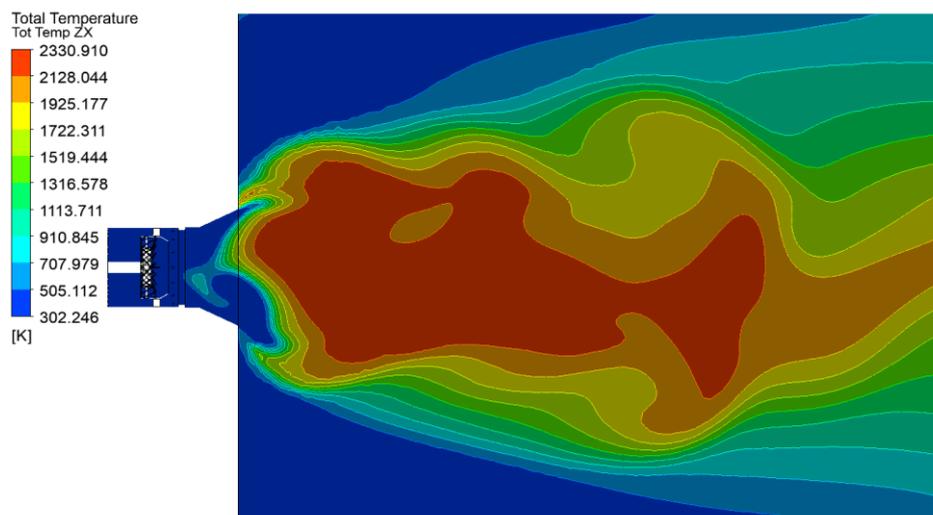


Рис. 8. Поле полной температуры при 8 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

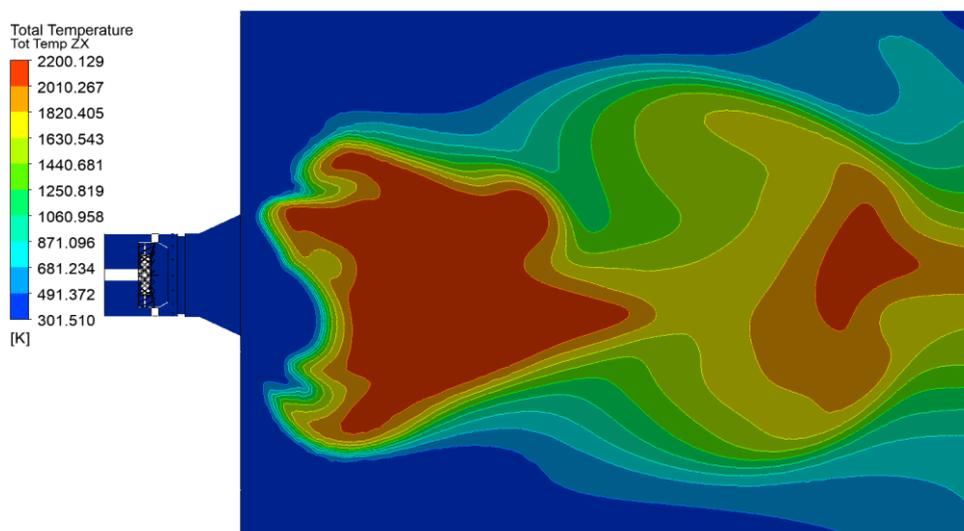


Рис. 9. Поле полной температуры при 10 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

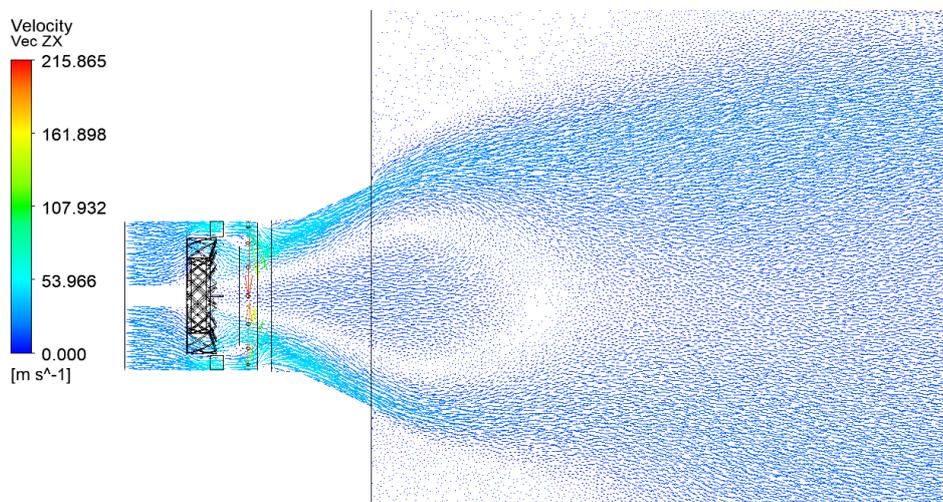


Рис. 10. Поле векторов скоростей при 4 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

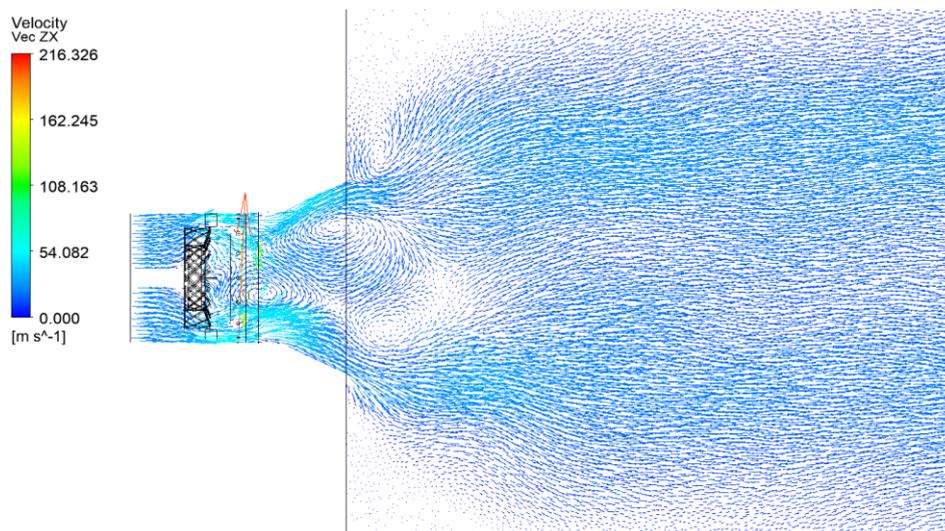


Рис. 11. Поле векторов при 6 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

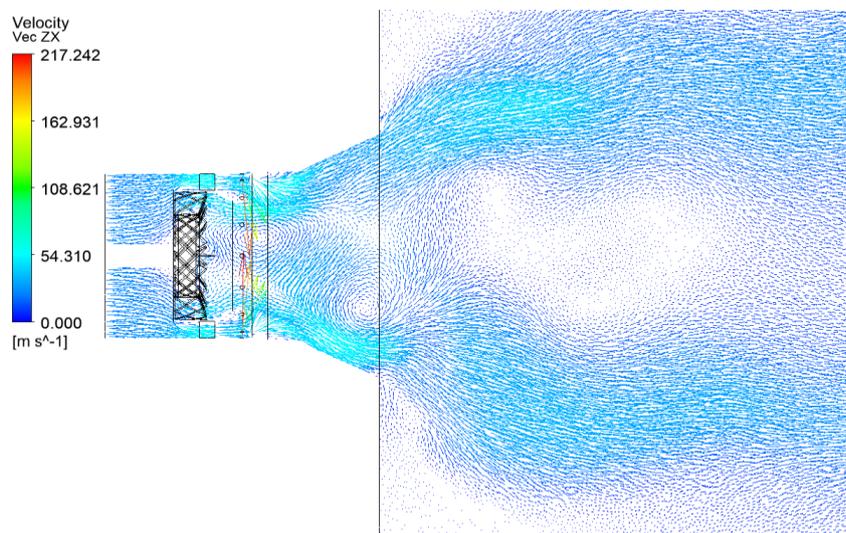


Рис. 12. Поле векторов при 8 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

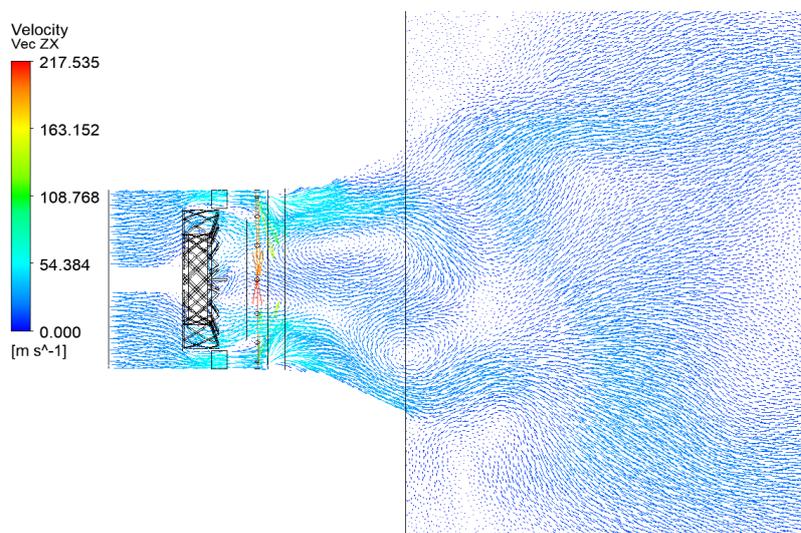


Рис. 13. Поле векторов при 10 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии

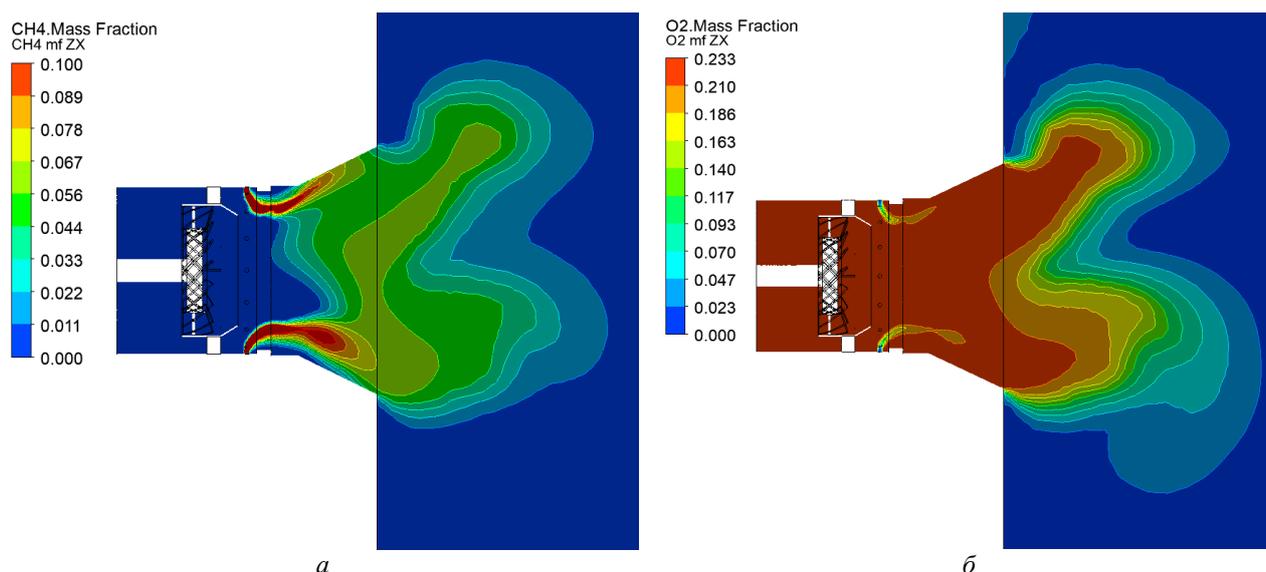


Рис. 14. Поле концентрации при 6 млн. элементов в продольном разрезе по вертикальной плоскости симметрии: а – CH_4 ; б – O_2 .

Анализируя температурные поля в зоне горения (рисунки 6-9) можно отметить, что для всех вариантов расчета факел несимметричен и деформирован относительно оси Z , что может быть обусловлено нестационарностью процесса горения и наличием турбулентных вихрей. Однако в варианте расчета с сеткой 6 млн. температурное поле имеет большую симметрию относительно оси вращения.

Также из рисунков 10-13 видно, что скорость метана на выходе из газывыводящих отверстий превышает скорость воздуха на входе в горелку в несколько раз, что обеспечивает достаточную пробивную способность струи метана, его подачу в зону горения и равномерное перемешивание метана с воздухом; аналогичная картина наблюдается для всех вариантов расчета.

В вариантах расчета с сеткой 6 млн. и 8 млн. можно наблюдать более выраженную зону обратных токов, что обеспечивает лучшее перемешивание метана с воздухом и выгорание, поля векторов представлены на рисунках 10-13. В варианте сетки 6 млн. максимальная температура составила 2600 К, в то время для всех остальных сеток максимальная температура составляла порядка 2200–2300 К, но такая температура проявляется в очень малых объемах, и в общем случае при осреднении температуры факела получаем примерно 2300 К.

В таблице 4 приведены значения среднерасходных полных температур, определенных на выходе модели и в поперечных сечениях расчетной модели, расположенные на различных расстояниях от зоны подвода метана.

Таблица 4

Результаты определения полных температур, осредненных по расходу

Количество элементов сетки, млн	T^* на расстоянии 1 м, К	T^* на расстоянии 2 м, К	T^* на расстоянии 3 м, К	T^* на расстоянии 4 м, К	$T^*_{\text{вых}}$, К
4	925,7	1585,4	1539,9	1304,7	1939,3
6	1711,2	1568,1	1604,9	1305,3	2251,8
8	1954,3	1682,9	1682,7	1153,8	2162,9
10	1605,3	1496,4	1426,6	1078,9	1844,9

Из таблицы 4 видно, что полные температуры, осредненные по расходу на выходе модели и в поперечных сечениях модели, для каждого варианта сетки различаются в пределах 200–

300К, однако в варианте расчета с сеткой на 4 млн. температура в поперечном сечении на расстоянии в 1 м от зоны подвода метана значительно отличается от других вариантов расчета, зона горения расположена дальше по ходу течения относительно других вариантов расчета (см. рисунок 6).

В таблице 5 приведены концентрации различных веществ в дымовых газах на выходе из расчётной области, осредненные по расходу.

Таблица 5

Массовые концентрации различных компонентов дымовых газов, осредненные по расходу

Количество элементов, млн	g_{CH_4}	g_{CO}	g_{CO_2}	g_{H_2O}	g_{O_2}
4	0,000292	0,000823	0,1079	0,0897	0,0150804
6	0,001656	0,004201	0,1183	0,1024	0,0000017
8	0,000641	0,002613	0,1181	0,1006	0,0007937
10	0,000353	0,000897	0,0974	0,0812	0,0180719

Анализируя таблицу 5, можно отметить, что концентрации различных компонентов в варианте расчета с сеткой 6 млн. отличаются от других вариантов сетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе моделирования процесса горения была рассчитана газомазутная горелка ГМ-10, предназначенная для установки на котлах ДКВЕ-10, и исследовано влияние размера элемента сетки на результаты моделирования. В ходе расчёта были получены поля параметров, которые в дальнейшем могут позволить верифицировать методику расчета по экспериментальным данным работы горелки. Также зона обратных токов и высокая нестационарность пламени, вызванная перемешиванием потоков за лопаточным завихрителем воздуха, требует моделирования при нестационарной постановке задачи, что в свою очередь требует значительных вычислительных мощностей. Тем не менее, полученные модели горелки можно в дальнейшем дорабатывать и приводить в соответствие с действительными условиями эксплуатации горелки. Подобные исследования позволят на основе данной методики производить расчеты по оптимизации горелки, нагревательных поверхностей котла, процесса горения, а также производить анализ концентрации вредных веществ дымовых газов. Анализируя полученные результаты расчетов, можно отметить, что вариант расчета при 8 млн. элементов является наиболее оптимальным с точки зрения времени расчета, затраченных ресурсов и физичности полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стерман Л.С.** Тепловые и атомные электростанции. М.: Энергоиздат, 1982. 456 с. [L. S. Sterman. "Thermal and nuclear power plants", (in Russia). Moscow, Energoizdat, 1982.]
2. **Буров В.Д.** Тепловые электрические станции. М.: Издательство МЭИ, 2009. 454 с. [V. D. Burov. "Thermal power stations", (in Russia). Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2009.]
3. **Бийский котельный завод.** [Электронный ресурс]. URL: <https://bikzg.ru/catalog/gorelki/gorelki-gm/gorelka-gm-10/> (дата обращения 07.11.2022).
4. **Павлов Е.С., Кишалов А.Е.** 3D-численное моделирование процесса горения природного газа в горелке ГМ-10. // Материалы XIV Всероссийской молодежной научной конференции: в 7-ми томах. Том 1 Часть 1. Уфа: УГАТУ 2020. Том 1. 116-127 с.
5. **Kishalov A.E, Akhmedzaynov D.A., Lipatov V.D.** Influence Estimate of Spectral Model of Combustion Product Radiation on Results of DKVR-10/13 Steam Boiler Furnace Simulating. // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering 2019.
6. **Кудоярова В. М., Кишалов А. Е.** Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS: учебное пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 219 с. [V. V. Kudoiarova, A. E. Kishalov. "Solving applied problems of heat transfer and hydrogas dynamics in the ANSYS package: textbook", (in Russia). Ufa: RIK UGATU, 2016.]

7. **ГОСТ 5542-87.** Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2004. 21 с. [GOST 5542-87. "Natural combustible gases for industrial and municipal purposes. Technical conditions", (in Russia). Moscow, Izdatel'stvo standartov. 2004.]

8. **D.C. Toncu, G. Toncu, S. Soleimani.** On methane pyrolysis special applications. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015

9. **J. Bibrzycki, T. Poinso.** Reduced chemical kinetic mechanisms for methane combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmosphere. [Электронный документ]. URL: http://www.cerfacs.fr/~cfdbib/repository/WN_CFD_10_17.pdf (дата обращения 07.11.2022)

10. **О.В. Беззапоня, Е.В. Вайтнер.** Основы процессов горения. Материальный и тепловой баланс процессов горения. [Электронный документ]. URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/7372/1/Vayutner_Bezzaaronna.pdf (дата обращения 07.11.2022)

11. **S. Khayamy.** Flow Field in a Gas Turbine Burner. [Электронный документ]. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1017888/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения 07.11.2022)

12. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Оферьева М.А.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272с. [A.B. Kaplun, E.M. Morozov, M.A. Ofer'eva. "ANSYS is in the hands of an engineer. Practical guide", (in Russia). Moscow, Editorial URSS. 2003.]

ОБ АВТОРАХ

ПАВЛОВ Егор Сергеевич, студент каф. АТИТ УУнит. Дипл. инженер-теплотехник (УГАТУ, 2020).

КИШАЛОВ Александр Евгеньевич, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики УУнит. Дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустановившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

METADATA

Title: Investigation of grid convergence in modeling the combustion process in the GM-10 burner.

Authors: E. S. Pavlov¹, A. E. Kishalov²

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

² Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹egorpavlov98@mail.ru, ²kishalov@ufanet.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1 (99), pp. 106-115, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problems of modeling combustion processes with the help of 3D numerical simulation of combustion processes are considered through the example of the GM-10 burner. The effect of the number of grid elements on the simulation results was studied. The main characteristics of the GM-10 burner are given, its 3D model with the output area is built. Various variants of the grid with a different number of elements have been built. The process of natural gas combustion in the GM-10 burner was simulated. Conclusions are drawn based on the simulation results. Further possibilities of using the model are considered.

Key words: numerical simulation; burner GM-10; combustion; natural gas; methane; grid research; grid convergence.

About authors:

PAVLOV, Egor Sergeyich, student of the Aviation Heat Power Engineering Department of UUST. Dipl. heating engineer (USATU, 2020).

KISHALOV, Alexandr Evgenyevich, Associate Professor of the Aviation Heat Power Engineering Department of UUST. Dipl. engineer of aircraft engines and power plants (USATU, 2006). Cand. of Tech. Sci. in thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft (USATU, 2010). Studies on the working processes in aircraft gas-turbine engines using steady-state and non-steady-state regimes, development of the mathematical models of complex technical objects, CAD of aircraft gas-turbine engines.