

УДК 697.1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ РАБОТЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ермолаев А.Н.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: ermolaevanton03@gmail.com

С применением программного комплекса ANSYS Multiphysics 12.1.4 (модуль FLUENT) выполнено моделирование горения и тепломассообмена при работе современных высокотемпературных газовых горелок инфракрасного излучения трех конструктивных вариантов: типового, изолированного и модернизированного. При рассмотрении типового варианта принята полная геометрическая модель излучателя, построенная на основании чертежа, прилагаемого заводом-изготовителем. Конструкция изолированной модели предполагает изоляцию корпуса излучателя, модернизированной – смену тонкостенного рефлектора на емкостной по принципу «водяной рубашки». Методом конечных элементов моделировались следующие процессы и явления: горение метана в кислороде воздуха, конвективный, кондуктивный и лучистый теплообмен, турбулентность. Выполнено адаптивное исследование для подбора математической модели турбулентности. При оценке достоверности результаты математического моделирования сопоставлены с эмпирическими зависимостями, полученными по результатам экспериментальных исследований на базе действующего производственного здания. Получены зависимости, расширяющие представление о тепловом режиме в зоне над высокотемпературными излучателями. Доказана эффективность предлагаемых автором технических решений газовых инфракрасных излучателей.

Ключевые слова: газовый инфракрасный излучатель, численное исследование, математическое моделирование, экспериментальные исследования, горение, тепломассообмен

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION AND HEAT AND MASS TRANSFER DURING OPERATION HIGH-TEMPERATURE GAS INFRARED HEATERS

Ermolaev A.N.

Federal State-funded Educational Institution of the Higher Education Tyumen Industrial University, Tyumen, e-mail: ermolaevanton03@gmail.com

Using the software package ANSYS Multiphysics 12.1.4 (FLUENT CFD-module) combustion and heat and mass transfer in modern high-temperature gas infrared heaters were simulated for three design solutions: typical, isolated and upgraded. Standard model is adopted complete geometric model of the heater, built on the basis of a manufacturer's drawing. The design of an isolated model assumes heater shell insulation, modernized model has the changed capacitive reflector working as a «water jacket». The finite element method simulated the following processes and phenomena: the combustion of methane with oxygen, convective, conductive and radiative heat transfer, turbulence. Adaptive research of the subject for selecting a mathematical model of turbulence was achieved. To assess the reliability of mathematical modeling the results were compared with the empirical dependences obtained from experimental research on the basis of existing production building. Understanding of the thermal conditions in the area of high-temperature heaters is expanded. The efficiency of author's technical solutions for gas infrared heaters is proven.

Keywords: gas infrared heater, numerical simulation, mathematical modeling, experimental investigations, combustion, heat and mass transfer

За много лет эксплуатации высокотемпературные газовые горелки инфракрасного излучения (ГГИИ) зарекомендовали себя как надежный, энергоэффективный и экологичный источник преобразования энергии топлива в тепловую энергию, используемую в дальнейшем для поддержания оптимального теплового режима крупногабаритных помещений: производственных цехов, складов, крупных павильонов, ангаров [3–5]. Коэффициент преобразования энергии топлива в тепловую энергию таких отопительных устройств достигает 98%. Высокотемпературные ГГИИ выпускаются рядом ведущих мировых компаний Германии, Италии, Амери-

ки, Франции, Венгрии, Словакии, Чехии, Польши. Предлагаемые компаниями излучатели отличаются друг от друга применяемыми материалами, геометрическими параметрами, конструкциями, назначением. В целом большая часть имеет сопоставимые типовые модели.

Несмотря на высокое качество типовых моделей ГГИИ их главным недостатком являются высокие затраты тепловой энергии на лучисто-конвективный теплообмен с верхней зоной помещения, в результате чего часть тепла удаляется системой вентиляции, а другая часть компенсирует тепловые потери через ограждающие конструкции верхней зоны.

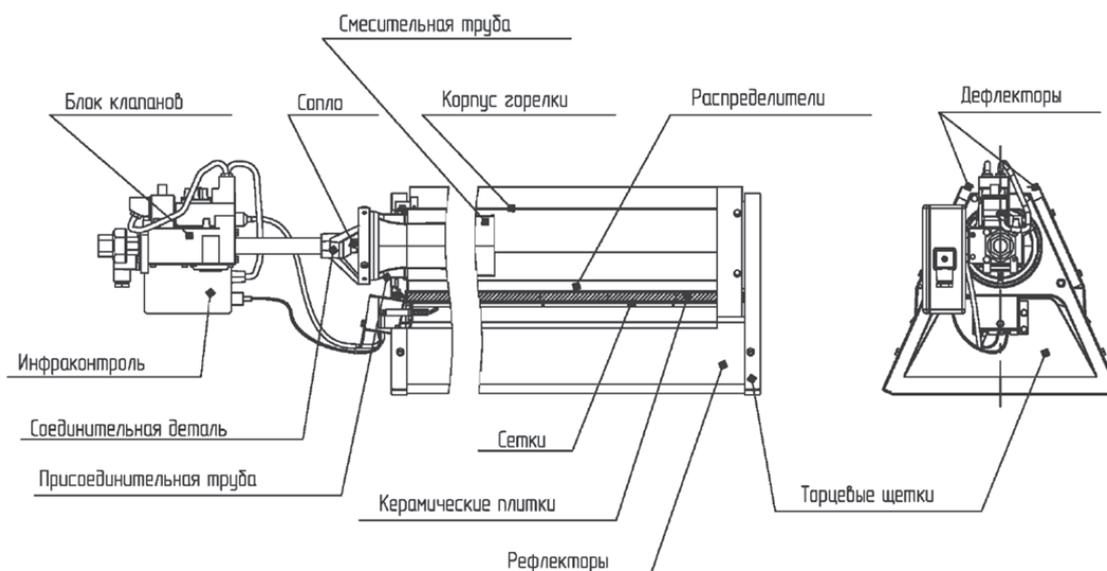


Рис. 1. Схема современной высокотемпературной ГГИИ типовой модели

Потери тепла с уходящими газами и конструкцией типовой модели ГГИИ можно с достаточной точностью определить по законам Стефана – Больцмана и Ньютона – Рихмана:

$$Q_{\text{п}} = I_{\text{пс}} \cdot B_{\text{р}} + \varepsilon_{\text{к}} \cdot C_0 \cdot F_{\text{к}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ок}}}{100} \right)^4 \right] + \alpha \cdot F_{\text{к}} \cdot (T_{\text{к}} - T_0), \quad (1)$$

где $I_{\text{пс}}$ – удельная энтальпия продуктов сгорания на 1 м^3 газообразного топлива при их температуре на выходе из области ограниченной рефлектором и коэффициенте избытка воздуха 1,05, Дж/м³; $B_{\text{р}}$ – расход газа, м³/с; $\varepsilon_{\text{к}}$ – степень черноты корпуса; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела (5,67), Вт/м²·К; $F_{\text{к}}$ – площадь корпуса ГГИИ, м²; $T_{\text{к}}$ – температура корпуса ГГИИ, К; $T_{\text{ок}}$ – температура ограждающей конструкции (любого материального тела, расположенного в непосредственной близости с излучателем), К; α – коэффициент теплообмена конвекцией (корпус ГГИИ – воздух), Вт/м²·К; T_0 – температура окружающего воздуха, К.

В среднем доля теплового потока, переданного излучением в рабочую зону, туда, где это необходимо, составляет только 50–65%. Остальная доля тепловой энергии приходится на потери тепла с уходящими газами 24–30% и конструкцией излучателя 18–29%, что существенно снижает коэффициент полезного действия всей системы отопления. Таким образом, исследование высокотемпературных ГГИИ с целью повышения эффективности их работы является актуальной задачей.

Для численного исследования к рассмотрению принята полная геометрическая модель газовой инфракрасной горелки тепловой мощностью 5 кВт в трех конструктивных исполнениях: типовом, изолированном и модернизированном. Типовая модель построена на основании чертежа, прилагаемого заводом-изготовителем АО «Сибшванк» (рис. 1). Конструкция изолированной модели предполагает изоляцию корпуса излучателя. При модернизированном конструктивном исполнении однослойный тонкостенный рефлектор заменяется на ёмкость, работающую по принципу «водяной рубашки»: вода поступает в ёмкость, нагревается до заданной температуры и отводится для дальнейшего использования (например, на нужды горячего водоснабжения). Последнее техническое решение защищено патентом на полезную модель № 167233.

С целью исследования протекающего тепломассообмена в циркуляционной области ГГИИ моделировался действующий экспериментальный стенд, позволяющий в сопряженной постановке проводить испытания излучателей на стадии их физического конструирования и сборки. Все экспериментальные исследования, результаты которых

представлены при сопоставлении с результатами математического моделирования, проведены на базе сконструированного экспериментального стенда, расположенного в реальных условиях производственного помещения. В ходе натурных испытаний задействована следующая поверенная и сертифицированная приборная база:

– измерение температуры над излучателем: аналогово-цифровой преобразователь ИТ-2, набор клеммных коробок УК-4, преобразователи термоэлектрические ТХК 0006 в количестве 20 штук, персональный компьютер Dell;

– измерение температуры на поверхности корпуса горелки – testo 480 с поверхностным зондом с подпружинной термопарой.

Схема экспериментальной установки на примере 5 кВт излучателя типовой модели с указанием мест установки датчиков представлена на рис. 2.

В ходе стендовых испытаний типовой, изолированной и модернизированной моделей ГГИИ расстояние между датчиками №№ 1–10 и I – IX, расположенными по вертикали и горизонтали в центре над излучателем соответственно, оставалось без изменений. Испытания каждой модели ГГИИ проводились по 40 минут со снятием показаний температур каждые 40 секунд с момента запуска, что позволило изучить изменение теплового режима над излучателем до и после выхода на стационарный ре-

жим. Натурные испытания газогорелочного устройства всех моделей выполнены при постоянном давлении 1270 Па.

Полученные экспериментальные данные показали, что температура по вертикали и по горизонтали, в местах установки датчиков 1–10 и I–IX соответственно, пульсирует во времени. Амплитуда возмущений характеризует появление над ГГИИ турбулентного потока. Пульсации графика во времени наблюдаются повсеместно при всех конструктивных исполнениях. Выход на стационар зафиксирован по истечении 20 минут непрерывной работы при полной тепловой нагрузке.

На основании эскизов ГГИИ и экспериментального стенда были построены их полные виртуальные прототипы. Построение расчетной сетки (рис. 3) выполнено средствами ANSYS Workbench.

Расчетная область ГГИИ и теплообмена представляет собой сопряженные газодинамические зоны со сдвоенными стенками в местах контакта. После средствами сеточного генератора произведено разбиение объема на конечные элементы – тетраэдры. Пробные расчеты с использованием сеток с разной топологией и числом ячеек показали, что принятая в данной работе сетка, содержащая около $3 \cdot 10^5$ контрольных объемов, обеспечивает низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.

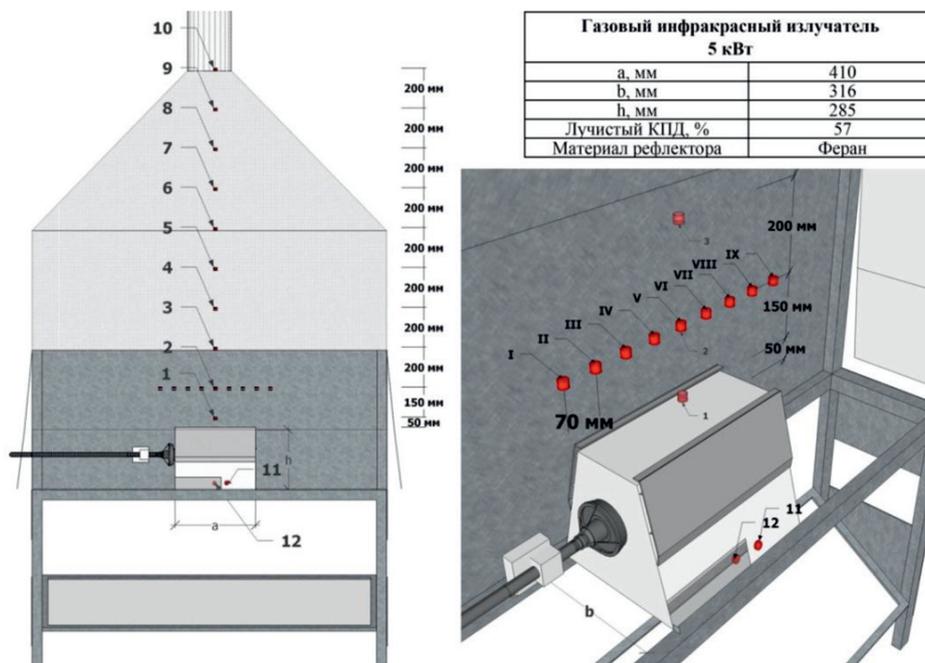


Рис. 2. Схема экспериментального стенда на примере 5 кВт ГГИИ



Рис. 3. Расчетная сетка моделируемых объектов

Граничные условия: материал конструкции излучателя – листовая сталь 12X18H10T с толщиной 0,002 м; топливо – метан (100%); окислитель – кислород; расход топлива – 0,5 м³/час; теоретический объем воздуха для полного сгорания – 9,52 м³/м³; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$; давление газа перед соплом – 1270 Па; коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость в зависимости от температуры: $\lambda = 0,018 \cdot T + 9$, Вт/(м·К); $c = -2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,45 \cdot T + 324,5$ Дж/(кг·К). Температура внутреннего воздуха в помещении принята +20 °С. Режим – стационарный. На стенках, ограничивающих расчетную область, заданы условия теплообмена 3-го рода.

С применением программного аппарата ANSYS Fluent 12.1.4 моделировались следующие процессы и явления: горение метана с кислородом воздуха, конвективный, кондуктивный и лучистый теплообмен, турбулентность.

Для выбора математической модели турбулентности произведено адаптационное исследование на примере типовой модели 5 кВт газового излучателя, в ходе которого исследовались три варианта: ламинарное течение, k- ϵ , k- ω модели турбулентности. Результаты представлены на рис. 4.

Сопоставление результатов адаптационного и экспериментального исследований,

представленных в нижней части рис. 4, показало лучшую сходимость при использовании стандартной k- ϵ модели турбулентности, согласно которой система уравнений движения жидкости дополняется двумя дифференциальными уравнениями, описывающими перенос соответственно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации ϵ [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - \rho C_{\epsilon 2} \epsilon), \quad (3) \end{aligned}$$

где $P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ – множитель, характеризующий генерацию энергии k.

Факторы Γ_k и Γ_ϵ определяются из уравнений

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad (4)$$

$$\Gamma_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (5)$$

где μ – вязкость; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Уравнения для параметров ϵ и μ_t :

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2}, \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (7)$$

Константы модели k- ϵ [6]: $C_\mu = 0,09$; $C_{\epsilon 1} = 1,44$; $C_{\epsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$.

Таким образом, можно заключить, что при работе высокотемпературного газового инфракрасного излучателя, не имеющего организованного отвода продуктов сгорания, будет протекать турбулентный поток в реагирующей среде в зоне выхода продуктов сгорания из области ограниченной рефлектором и над излучателем. Турбулентность вызвана по большей степени разностью давлений на выходе из области ограниченной рефлектором (избыток) и над излучателем (разряжение). С учетом вышеизложенного, в расчетах за основу принята стандартная k- ϵ модель турбулентности. Расчет лучистого теплообмена выполнен с применением модели излучения Discrete Ordinates (DO). Для описания протекающей химической реакции принята кинетическая модель ламинарного горения.

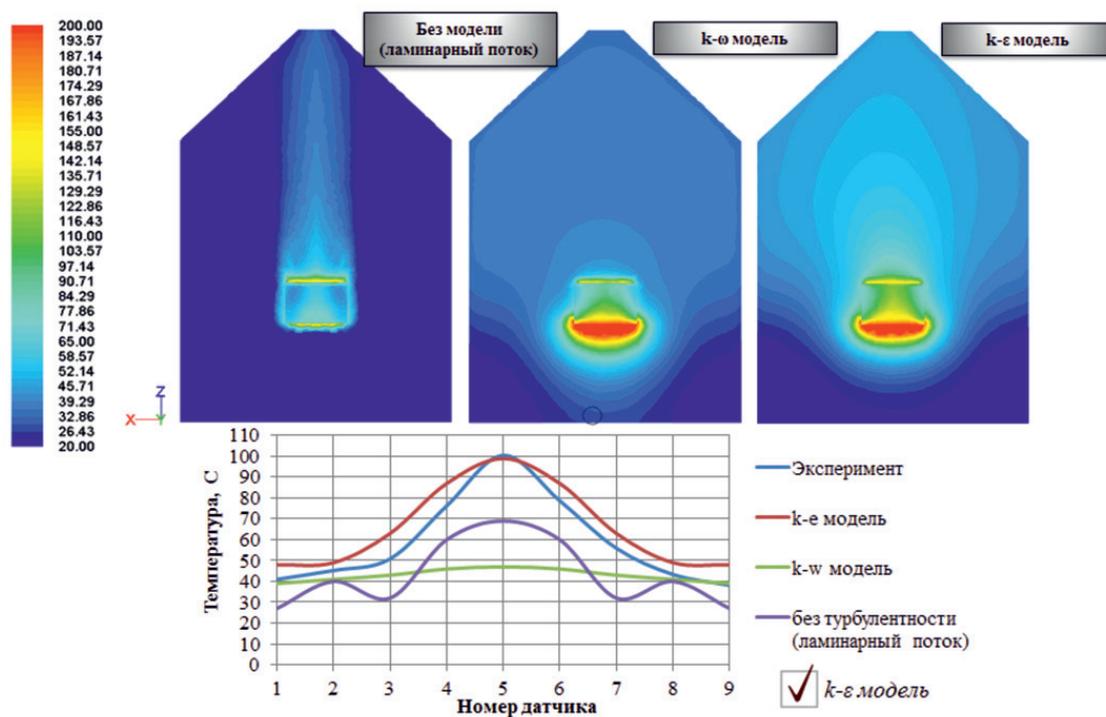


Рис. 4. Температурные поля ($^{\circ}\text{C}$) при адапционном исследовании

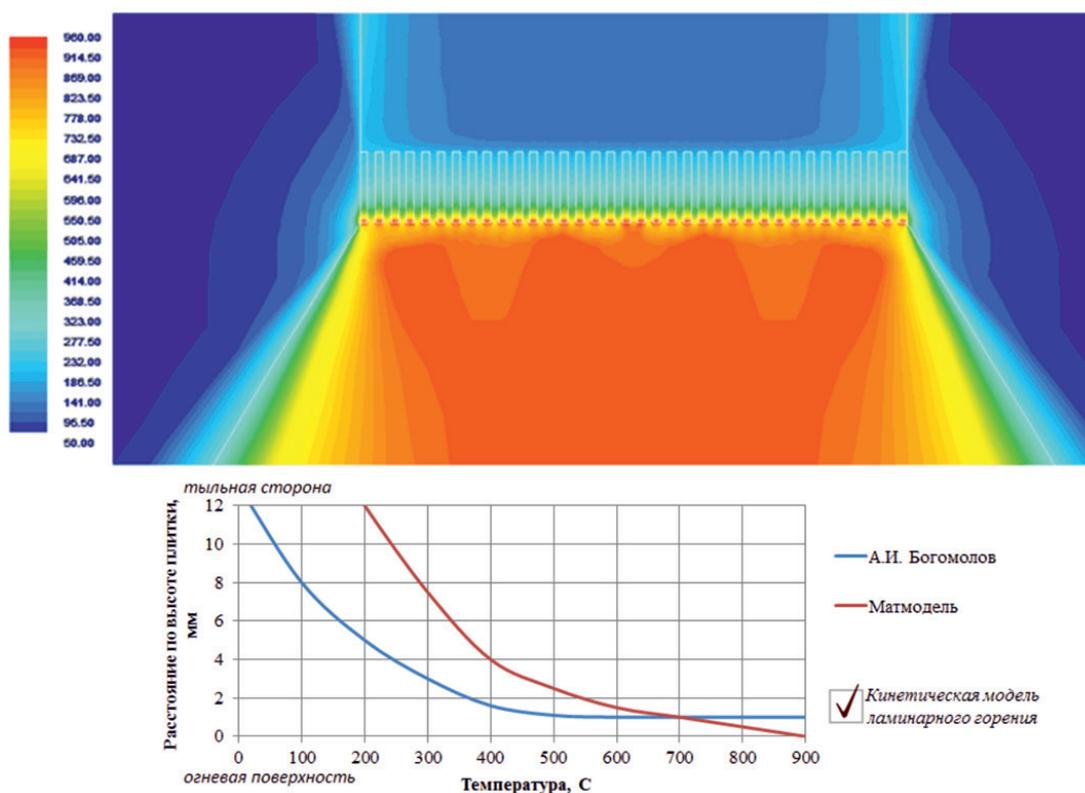


Рис. 5. Температурные поля ($^{\circ}\text{C}$) при горении в ГГИИ

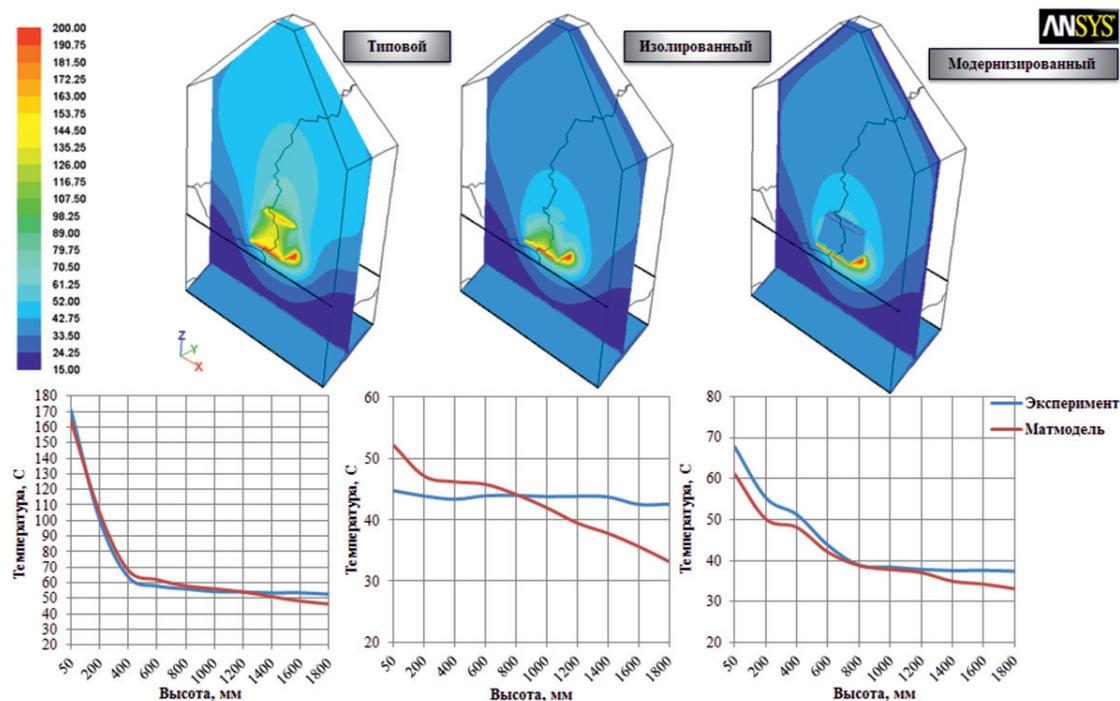


Рис. 6. Температурные поля (°C) при работе типовой, изолированной и модернизированной моделей высокотемпературного ГТТИ тепловой мощностью 5 кВт

Горение в таких отопительных устройствах протекает следующим образом: газ из газопровода подается на вход блока клапанов, который снижает давление до требуемой величины. После газ, проходя сопло, попадает в смесительную камеру, в процессе чего инжектируется необходимое количество воздуха для горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$ и смешивается. Газовоздушная смесь равномерно распределяется распределителями по керамическим плиткам и выходит из отверстий. Контроллер посредством высоковольтного разряда на свече зажигания воспламеняет газовоздушную смесь. После появления пламени, контролируемого датчиком наличия пламени, контроллер отключает свечу зажигания. Газовоздушная смесь сгорает в отверстиях диаметром 1,3 мм у наружной поверхности керамических плиток. Горение в начальный период происходит в зоне малой толщины над поверхностью, а затем пламя заходит в устье каналов, благодаря чему керамическая плитка разогревается до 900 °C и более. Температура плитки напрямую зависит от давления газа перед соплом и материала самой плитки.

Результаты математического моделирования горения (рис. 5), воспроизводящие

реальные условия работы исследуемого высокотемпературного газового инфракрасного излучателя, показали значения температур не противоречащие данным других исследователей: А.И. Богомолова, Д.Я. Вигдорчика, М.А. Маевского [1]. Увеличение температуры по толщине плитки объясняется применением более совершенных материалов при изготовлении перфорированного керамического насадка.

Результаты численного исследования горения и теплообмена при работе трех конструктивных решений высокотемпературных ГТТИ представлены на рис. 6

Графики в нижней части рис. 5 иллюстрируют распределение температур по высоте в центре над газовой инфракрасной горелкой при сопоставлении результатов численного исследования с результатами выполненных натуральных испытаний. Погрешность не превышает 10%.

Выводы

1. Полученные результаты подтверждают применимость программного комплекса ANSYS Fluent 12.1.4 для моделирования процесса горения и протекающего теплообмена при решении задач конструирования и оптимизации высокотемпературных газовых инфракрасных горелок.

2. Предлагаемые автором технические решения позволяют повысить эффективность работы высокотемпературной ГГИИ, в частности:

– типовая модель: температура в центре над излучателем в точке расположения датчика № 1 составила в среднем 167 °С; потери тепла с уходящими газами составили 24% или 1192 Вт; потери тепла конструкцией 18% или 896 Вт;

– изолированная модель: температура в центре над излучателем в точке расположения датчика № 1 составила в среднем 48 °С; потери тепла с уходящими газами составили 37%, или 1841 Вт; потери тепла конструкцией 0%, или 0 Вт;

– модернизированная модель: температура в центре над излучателем в точке расположения датчика № 1 составила в среднем 64 °С; потери тепла с уходящими газами составили 18%, или 877 Вт; потери тепла конструкцией 7%, или 364 Вт.

Данные представленные в процентном соотношении от тепловой мощности (располагаемой теплоты) показывают, что наибольшая эффективность достигается при использовании модернизированной модели ГГИИ.

3. Выполненное адаптационное исследование подтверждает появление турбулентной реагирующей среды при работе излучателя, не имеющего организованного отвода продуктов сгорания.

4. Разработаны виртуальные прототипы высокотемпературного газового инфракрасного излучателя и экспериментального стенда на основе математического моделирования горения и теплообмена, позволяющие в сопряженной постановке на этапе проектирования расчетным методом и визуально оценить поведение инженерных решений излучателей в реальных условиях их эксплуатации, а также произвести предэксплуатационную проверку работоспособности, эффективности и надежности основных технических решений с меньшими трудозатратами.

5. На основе численных и экспериментальных исследований получены зависимости распределения температурных

полей в циркуляционной области ГГИИ, позволяющие судить о протекающем тепловом режиме.

Список литературы

1. Богомолов А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А.И. Богомолов. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1967. – 255 с.
2. Кочевский А.Н., Неня В.Г. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах // Вестник СумДУ. – 2003. Т. 59. – № 13. – С. 195–210.
3. Куриленко Н.И., Давлятчин Р.Р., Ермолаев А.Н. Особенности регулирования систем газового инфракрасного обогрева // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3042.
4. Куриленко Н.И., Чекардовский М.Н., Михайлова Л.Ю., Ермолаев А.Н. Повышение коэффициента полезного действия лучистой системы отопления с применением в качестве отопительных приборов «светлых» газовых инфракрасных излучателей // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3339.
5. Куриленко Н.И., Михайлова Л.Ю., Ермолаев А.Н. Создание низкочастотной системы рекуперации тепла на примере «светлого» газового инфракрасного излучателя // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2015. – № 6 (98). – С. 52–57.
6. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.

References

1. Bogomolov A.I. Gazovye gorelki infrakrasnogo izlucheniya i ikh primeneniye / A.I. Bogomolov. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1967. 255 p.
2. Kochevskiy A.N., Nanya V.G. Sovremennyy podkhod k modelirovaniyu i raschetu techeniy zhidkosti v lopastnykh gidromashinakh. Vestnik SumDU. 2003. T. 59. no. 13. pp. 195–210.
3. Kurilenko N.I., Davlyatchin R.R., Ermolaev A.N. Osobennosti regulirovaniya sistem gazovogo infrakrasnogo obogreva. Inzhenernyi vestnik Dona (Rus). 2015, no. 2, available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3042.
4. Kurilenko N.I., Chekardovsky M.N., Mikhailova L.Y., Ermolaev A.N. Povysheniye koeffitsiyenta poleznogo deystviya luchistoy sistemy otopeniya s primeneniym v kachestve otopitel'nykh priborov «svetlykh» gazovykh infrakrasnykh izluchateley. Inzhenernyi vestnik Dona (Rus). 2015, no. 4, available at: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3339.
5. Kurilenko N.I., Mikhailova L.Y., Ermolaev A.N. Sozdaniye nizkozatratnoy sistemy rekuperatsii tepla na primere «svetlogo» gazovogo infrakrasnogo izluchatelya. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Energoberezeniye i vodopodgotovka», 2015, no. 6 (98), pp. 52–57.
6. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1974. Vol. 3. pp. 269–289.