

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТЕРРАСНОМ ИНФРАКРАСНОМ ГАЗОВОМ ОБОГРЕВАТЕЛЕ

КОРЕПАНОВ М. А., ШАКЛЕИН А. А., АЛЬЕС М. Ю.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты математического моделирования процессов, протекающих в террасном инфракрасном газовом обогревателе. Целью исследования была разработка технических решений по оптимизации и улучшению термогазодинамических и тепловых процессов в обогревателе. Проведено численное моделирование, имитирующее ветровую нагрузку, показано, что уже при скорости бокового ветра 2 м/с возможен проскок пламени за перфорированную стенку камеры сгорания обогревателя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газовый обогреватель, термогазодинамика, горение, поле температур, поле скоростей.

Устройство террасного инфракрасного газового обогревателя подразумевает открытую камеру сгорания с перфорированной обечайкой (рис. 1). Тепловое излучение формируется за счет излучения от горячих продуктов сгорания, перфорированной обечайки камеры сгорания и отражателя, размещенного над камерой сгорания. Топливом, как правило, являются сжиженные углеводороды (пропан-бутан), поступающие в форсунку под давлением через редуктор.

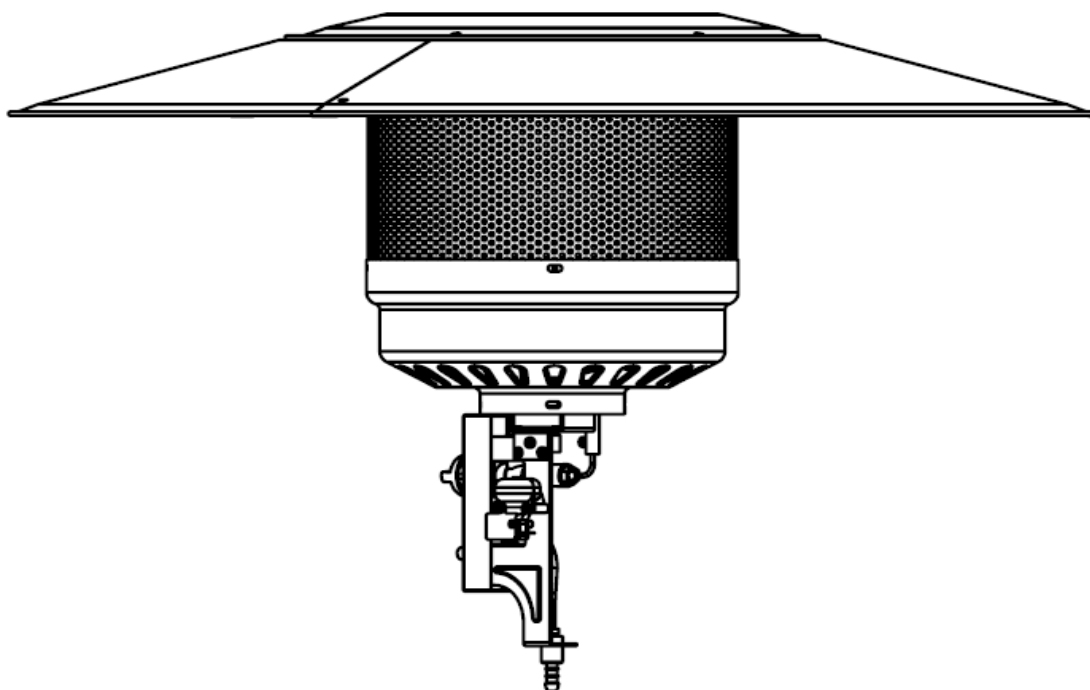


Рис. 1. Общий вид горелочного устройства и камеры сгорания с отражателем террасного инфракрасного газового обогревателя

Описанию и моделированию процессов горения углеводородных топлив посвящены работы как отечественных [1, 2], так и зарубежных авторов [3 – 5]. Методам решения задач газовой динамики и теплообмена в реагирующих потоках посвящены работы [6 – 8].

Как и в большом количестве газовых обогревателей в рассматриваемом террасном инфракрасном газовом обогревателе, происходящие в нем процессы образования топливной смеси, ее горения в камере сгорания, теплообмена с элементами конструкции, можно разделить на отдельные задачи: первая – моделирование смешения эжектирующего горючего газа с воздухом для образования топливной смеси и вторая – моделирование процессов горения и теплообмена в камере сгорания и за ее пределами.

Также следует выделить требования по безопасности продуктов сгорания, в первую очередь по угарному газу CO, т. к. обогреватели данного типа предназначены для использования на летних террасах кафе и ресторанов в прохладное время. Процессам образования загрязняющих веществ при горении углеводородов на воздухе и методам моделирования этих процессов посвящены работы [9, 10].

Целью данной работы являлось численное исследование процессов, протекающих в газовом обогревателе, с целью разработки технических решений по оптимизации и улучшению процессов в серийно выпускаемых на Ижевском заводе тепловой техники террасных инфракрасных газовых обогревателей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЫХ НАГРЕВАТЕЛЯХ

Для численного расчета работы газового обогревателя необходимо описать следующие процессы: гидромеханика многокомпонентного газа; турбулентность; выделение и передача тепловой энергии, связанные с процессом горения.

Моделирование указанных процессов производится следующим образом. Газовая среда описывается уравнениями механики сплошной среды. Газодинамика моделируется осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса с замыканием $k-\varepsilon$ моделью турбулентности. Горение рассчитывается турбулентной моделью EDM (Eddy Dissipation Model) [11, 12].

Газовая среда

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = \bar{I}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_t + \mu) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \bar{F}_{p \rightarrow g, i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{Y}_F}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{Y}_F \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} + \rho D \right) \frac{\partial \bar{Y}_F}{\partial x_j} - v_F \rho \bar{W} + \bar{I}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{Y}_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{Y}_{O_2} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} + \rho D \right) \frac{\partial \bar{Y}_{O_2}}{\partial x_j} - v_{O_2} \rho \bar{W}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{Y}_{CO_2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{Y}_{CO_2} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} + \rho D \right) \frac{\partial \bar{Y}_{CO_2}}{\partial x_j} + v_{CO_2} \rho \bar{W}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{Y}_{H_2O}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{Y}_{H_2O} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} + \rho D \right) \frac{\partial \bar{Y}_{H_2O}}{\partial x_j} + \nu_{H_2O} \rho \bar{W}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{h} u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C \frac{\mu_t}{Pr_t} + \lambda \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \bar{Q}_{p \rightarrow g}, \quad (7)$$

$$p = \rho R \bar{T}. \quad (8)$$

Для замыкания осредненной системы уравнений Навье-Стокса используется модель турбулентности $k - \varepsilon$:

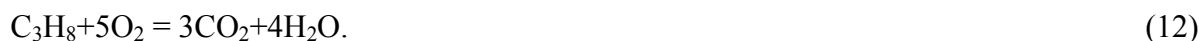
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_k \mu_t + \mu) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho \varepsilon, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_\varepsilon \mu_t + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (10)$$

где турбулентная вязкость вычисляется по формуле

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

В качестве топлива рассматривался пропан C_3H_8 . Горение газа моделируется брутто-реакцией следующего вида



Кроме вышеприведенных в соотношении (12) веществ в расчетах учитывается инертный азот (N_2).

Скорость реакции определяется по турбулентной модели горения EDM:

$$\bar{W} = A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{\bar{Y}_F}{\nu_F}, \frac{\bar{Y}_{O_2}}{\nu_{O_2}} \right). \quad (13)$$

Теплопередача излучением рассчитывается с помощью модели P_1 [13]. Излучение считается изотропным, рассеянием пренебрегается. Дифференциальное уравнение переноса интеграла интенсивности излучения выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{\partial x_j} \left(\frac{1}{3\bar{\kappa}} \frac{\partial \bar{G}}{\partial x_j} \right) + \bar{\kappa} (4\sigma \bar{T}^4 - \bar{G}) = 0. \quad (14)$$

Газовая среда считается серой, коэффициент поглощения определяется весовым осреднением по компонентам

$$\bar{\kappa} = \sum \bar{Y}_i \kappa_i. \quad (15)$$

Твердое тело

Элементы конструкции камеры сгорания участвуют в процессе теплообмена. Уравнение переноса тепла в твердом теле выглядит следующим образом

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j}. \quad (16)$$

Взаимодействие "газ–твердое тело"

Для уравнений сохранения энергии (тепла) ставится граничное условие сопряжения:

$$T_s = \bar{T}, \quad (17)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = - \left(C \frac{\mu_t}{Pr_t} + \lambda \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} + \bar{q}_w^r, \quad (18)$$

где \bar{q}_w^r – радиационный тепловой поток на поверхности материала корпуса дизельной горелки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из условий безопасной эксплуатации газовых обогревателей является соблюдение условия непроскока пламени в смеситель [14], что в свою очередь позволяет разделить моделирование процессов в газовом обогревателе на две части:

- процессы в смесителе;
- процессы в камере сгорания.

Моделирование работы смесителя

Целью моделирования процессов в смесителе является проверка режима его работы, в первую очередь, обеспечение соотношения компонентов – первичного коэффициента избытка окислителя (α) на уровне 0.4÷0.5, что с одной стороны, обеспечивает непроскок пламени в смеситель, а с другой – должно обеспечить полноту сгорания газа с минимальным содержанием вредных веществ, в первую очередь, CO.

Диаметр форсунки (1.8 мм) определяется потребным расходом топлива для получения заданной мощности и перепадом давления на форсунке, который зависит от используемого редуктора (37 мбар).

На рис. 2 приведена картина смешения струи углеводорода с воздухом. В перемешанной смеси массовая доля углеводородов (пропана) составляет 0.12, что соответствует коэффициенту избытка окислителя $\alpha = 0.5$.

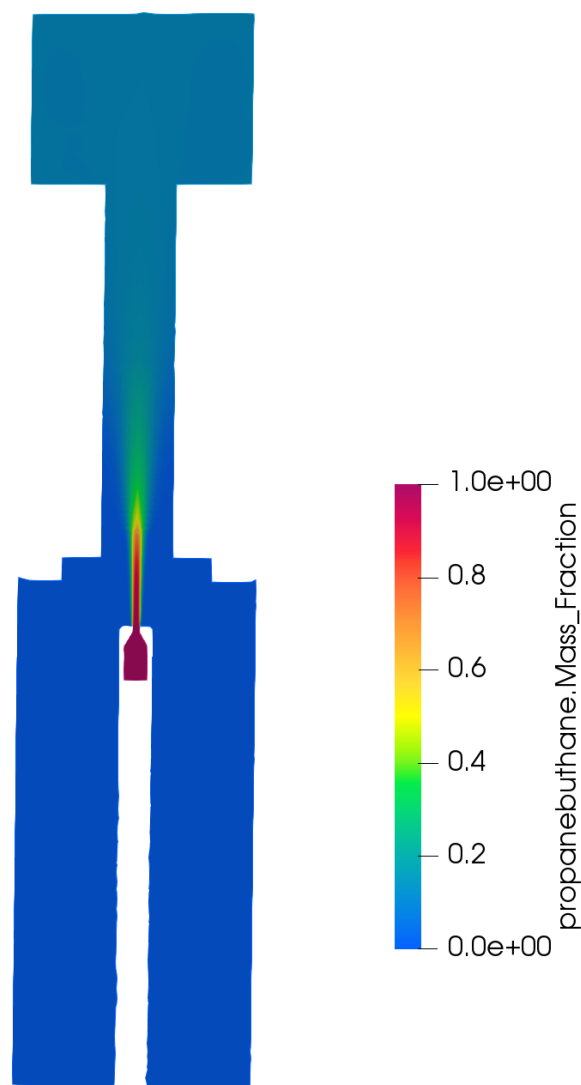


Рис. 2. Картина смешения струи углеводородов (пропан) с воздухом

Моделирование процессов в камере сгорания

Целью моделирования являлось изучение процессов в камере сгорания для оптимизации конструкции, определения ее теплового режима и дополнительно для определения устойчивости процесса горения при ветровой нагрузке, т.к. террасный обогреватель предназначен для работы на открытых площадках.

Результаты расчетов – поле температур продуктов сгорания на рис. 3, 4.

Из-за особенностей эксплуатации террасного обогревателя существует опасность срыва пламени при боковом ветре. Для проверки работоспособности обогревателя при боковом ветре были проведены дополнительные расчеты, результаты которых представлены на рис. 5, 6. По результатам моделирования было определено, что боковой ветер со скоростью 2 м/с приводит к незначительному изменению процесса горения в камере, что можно объяснить защитой, которая создается перфорированными стенками. При этом пламя горелки не срывается, и только ядро пламени смещается по ветру, температура пламени остается на прежнем уровне. Однако, стоит отметить, что уже даже при таком ветре в отдельные моменты времени языки пламени вырываются за перфорированную стенку (рис. 5, а, рис. 6).

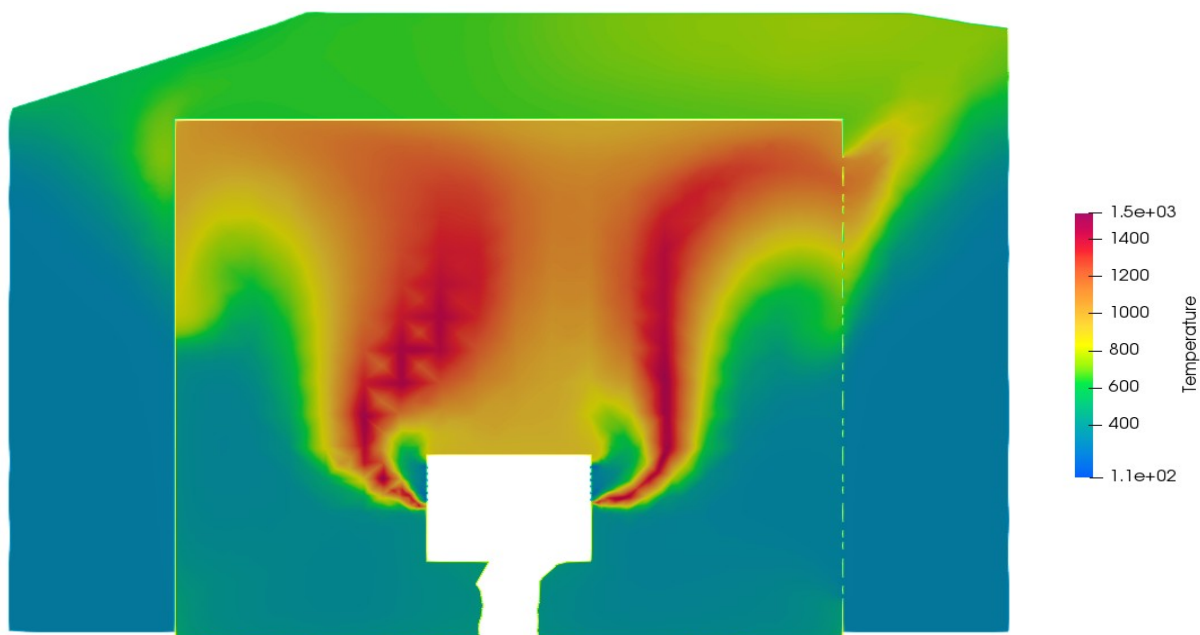


Рис. 3. Поле температур продуктов сгорания

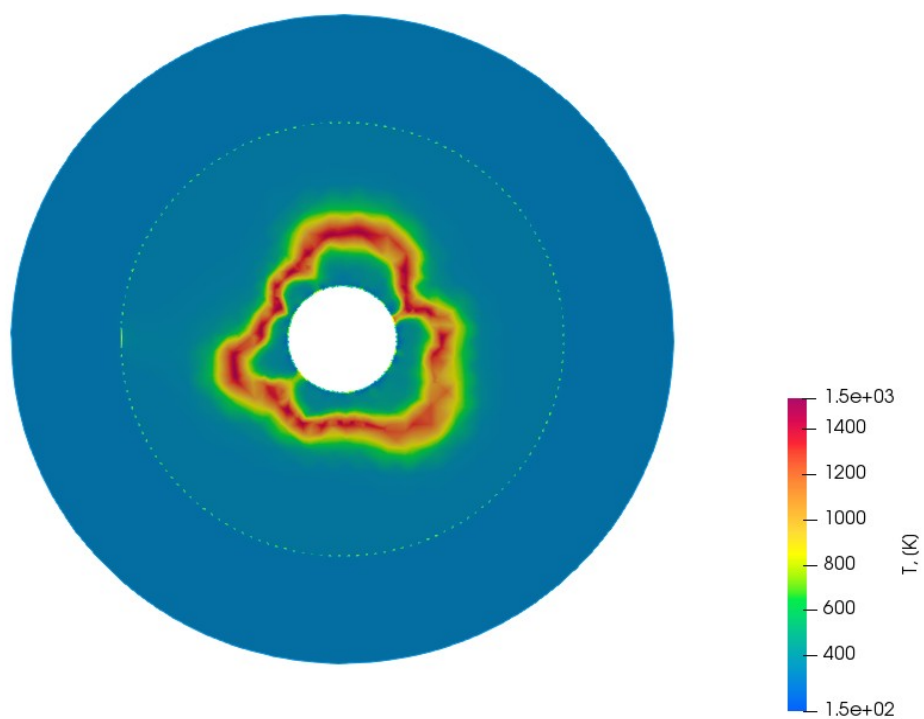
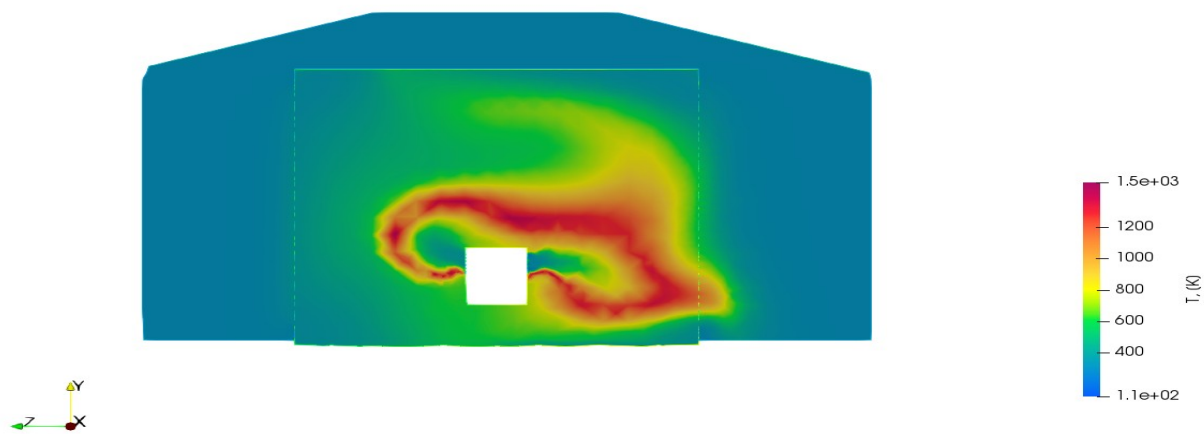
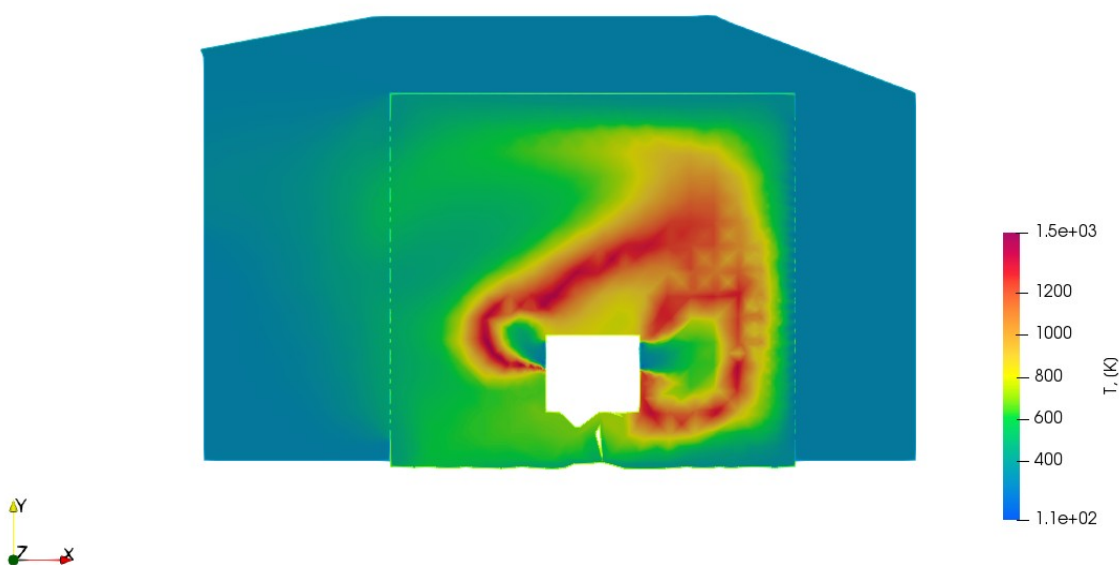


Рис. 4. Поле температур продуктов сгорания (горизонтальное сечение)



a)



б)

Рис. 5. Поле температур продуктов сгорания в разные моменты времени

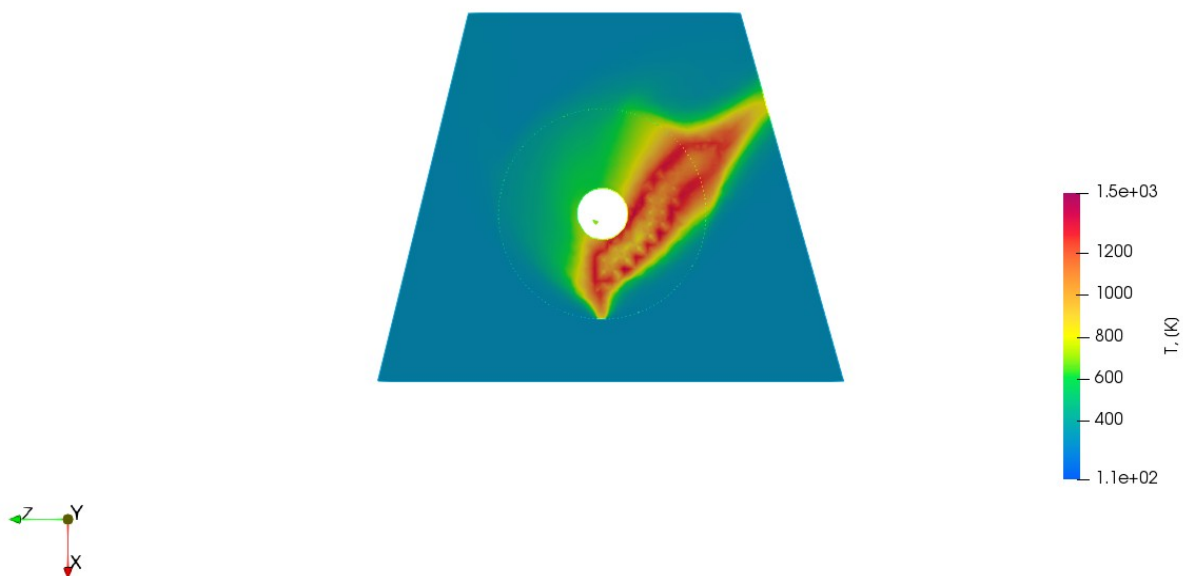


Рис. 6. Поле температур продуктов сгорания (горизонтальное сечение)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные численные исследования процессов в террасном газовом обогревателе подтвердили выбранные конструктивные размеры и параметры зоны смешения, подготовки топливной смеси, термодинамические параметры в камере сгорания и тепловой режим элементов конструкции при работе на стационарном режиме.

Проведена проверка работы горелки при боковом ветре.

Показано, что уже при скорости ветра 2 м/с возможен проскок пламени за перфорированную стенку.

В связи с этим рекомендуется устанавливать обогреватели данного типа в ветрозащищенных местах, либо ограничить их использование при наличии ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Черенков А. С. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках. Учебное пособие для вузов. М.: Химия, 2000. 520 с.
2. Алексеев Б. В., Гришин А. М. Физическая газодинамика реагирующих сред. Учебное пособие для мех.-мат. и физ. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1985. 464 с.
3. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен: пер. с англ. Р.Н. Гизатуллина, В. И. Ягодкина, под ред. В. Е. Дорошенко. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
4. Билджер Р. В. Турбулентное струйное диффузионное пламя // В кн.: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: пер. с англ., ред. Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн и др. М.: Машиностроение, 1981. С. 168-216.
5. Билджер Р. В. Турбулентные течения предварительно перемешанных реагентов // В кн.: Турбулентные течения реагирующих газов: пер. с англ., под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. М.: Мир, 1983. С. 100-165.
6. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
7. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков: пер. с англ., под ред. В. Л. Зимонта, П. И. Чушкина. М.: Мир, 1990. 662 с.
8. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
9. Боумэн К. Т. Кинетика образования и разложения загрязняющих веществ при горении // В кн.: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: пер. с англ., ред. Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн. М.: Машиностроение, 1981. С. 59-83.
10. Каретто Л. С. Математическое моделирование образования загрязняющих веществ // В кн.: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: пер. с англ., ред. Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн. М.: Машиностроение, 1981. С. 84-137.
11. Menter F., Carregal F. J., Esch T., Konno B. The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines // Proceedings of the International Gas Turbine Congress, Tokyo, Japan, 2003. 7 p.
12. Pitsch H., Peters N. A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects // Combustion and Flame, 1998, vol. 114, pp. 26-40.
13. Modest M. F. Radiative heat transfer. Second Edition, Academic Press, Elsevier Science, London, New York, 2003. 822 p.
14. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок. Утверждены Приказом Минэнерго России от 24.03.2003 № 115.

Simulation of Processes in a Terrace Infrared Gas Heater

Korepanov M. A., Shaklein A. A., Alies M. Yu.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The results of mathematical modeling of processes occurring in a terrace infrared gas heater operating on liquefied petroleum gas are presented. The aim of the study was to develop technical solutions for the optimization and improvement of thermo-, gas-dynamic and thermal processes in the heater. Numerical simulations have been carried out to simulate the wind load; it has been shown that even at a crosswind speed of 2 m/s, flame breakthrough is possible beyond the perforated wall of the heater combustion chamber. Therefore, it is recommended to install heaters of this type in windproof places, or limit their use in the presence of wind.

KEYWORDS: gas heater, thermogasdynamics, combustion, temperature field, velocity field.

REFERENCES

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Cherenkov A. S. *Osnovi teorii fiziko-chimicheskikh processov v teploviykh dvigatelyakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Theoretical fundamentals of physical and chemical processes in heat engines and power plants]. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Khimiya Publ., 2000. 520 p.
2. Alekseev B. V., Grishin A. M. *Fizicheskaya gazodinamika reagiruyushchikh sred* [Physical gas dynamics of reacting media]. Uchebnoe posobie dlya mekh.-mat. i fiz. spets. vuzov. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1985. 464 p.
3. Spalding D. B. *Combustion and mass transfer: A Textbook with Multiple-Choice Exercises for Engineering Students*. Oxford etc. Elsevier, 1979. 418 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02947-7>
4. Bildzher R. V. Turbulentnoe struynoe diffuzionnoe plamya. V kn.: *Obrazovanie i razlozhenie zagryaznyayushchikh veshchestv v plameni* [Pollution formation and destruction in flames]. Per. s angl., red. N. A. Chigir, R. Dzh. Veynberg, K. T. Boumen i dr. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, pp. 168-216.
5. Bilger R. W. Turbulent flows with nonpremixed reactants. In book: *Turbulent Reacting Flows* Editors: Libby, P.A., Williams, F.A. (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, 1980, pp. 65-113.
6. Volkov K. N., Emelyanov V. N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Large eddy simulation in turbulent flow calculations]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2008. 368 p.
7. Oran E. S., Boris J. P. *Numerical simulation of reactive flows*. Cambridge University Press, by Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1987.
8. Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. *Chislennoye modelirovanie processov teplo- i massoobmena* [Numerical modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 288 p.
9. Boumen K. T. Kinetika obrazovaniya i razlozheniya zagryaznyayushchikh veshchestv pri gorenii. V kn.: *Obrazovanie i razlozhenie zagryaznyayushchikh veshchestv v plameni* [Pollution formation and destruction in flames]. Per. s angl., red. N. A. Chigir, R. Dzh. Veynberg, K. T. Boumen i dr. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, pp. 59-83.
10. Karetto L. S. Matematicheskoye modelirovanie obrazovaniya zagryaznyayushchikh veshchestv. V kn.: *Obrazovanie i razlozhenie zagryaznyayushchikh veshchestv v plameni* [Pollution formation and destruction in flames]. Per. s angl., red. N. A. Chigir, R. Dzh. Veynberg, K. T. Boumen i dr. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, pp. 84-137.
11. Menter F., Carregal F. J., Esch T., Konno B. The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, Tokyo, Japan, 2003. 7 p. http://www.zaidan.info/seikabutsu/2003/00916/pdf/igtc2003tokyo_ts059.pdf

12. Pitsch H., Peters N. A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects. *Combustion and Flame*, 1998, vol. 114, pp. 26-40. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(97\)00278-2](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(97)00278-2)

13. Modest M. F. *Radiative heat transfer*. Second Edition, Academic Press, Elsevier Science, London, New York, 2003. 822 p.

14. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii teplovykh energoustanovok* [Rules for the technical operation of thermal power plants]. Utverzhdeny Priказom Minenergo Rossii ot 24.03.2003 no. 115.

Корепанов Михаил Александрович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: kma@udman.ru

Шаклеин Артем Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: shaklein@udman.ru

Альес Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: aliesmy@mail.ru