

UDC 621.18

NUMERICAL STUDY OF AERODYNAMICS IN DEAD-END FURNACE WITH REVERSE FLAME

S.A. Khaustov, A.S. Zavorin

Tomsk Polytechnic University

The authors have modeled turbulent combustion of natural gas in the reverse flame of fire-tube boiler using the ANSYS Fluent 12.1.4. The complete geometric model of the dead-end furnace based on boiler drawings was considered. Finite element model was used for the following processes and phenomena: the combustion of methane in air oxygen, radiant and convective heat transfer, turbulence. Aerodynamic structure and volumetric pressure fields of the flame were calculated for different degrees of spin-fuel jet. The effect of the twist parameter on a drag coefficient of dead-end furnace was estimated. The authors calculated critical twist parameter values when the disruption of the flow and reversal currents zone in the axial region occurs. The results are presented in graphical form.

Key words:

Numerical simulation, fire-tube boiler, dead-end furnace, aerodynamics, aerodynamic resistance, twist parameter.

REFERENCES

1. Khaustov S.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. 322, 4, pp.43–47.
2. *Aerodinamicheskiy raschet kotlov* (Aerodynamic boiler design) (Normativnyy metod). Saint-Petersburg, Energiya, 1977. 256 p.
3. Akhmedov R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Ju. *Aerodinamika zakruchennoj strui* (Aerodynamics of a swirl jet). Moscow, Energiya, 1977. 240 p.

УДК 536.24

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ЦЕНТРА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРЕВЕ ПЛОСКОГО ТЕЛА

Ю.В. Видин, Д.И. Иванов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: idi86@inbox.ru

С использованием аналитических зависимостей разработан приближенный метод расчета пространственной координаты перемещения теплового центра в случае несимметричного нагрева плоского тела конвективными потоками тепла. В таком случае тепловой центр в ходе процесса нагрева плоского тела конвективными потоками тепла начинает перемещаться, т. е. пространственная координата, соответствующая экстремуму производной температуры по координате, оказывается некоторой функцией времени. Установлен характер зависимости пространственной координаты от времени, что имеет важное теоретическое и практическое значение. С использованием предложенных зависимостей возможен также расчет момента времени, при котором прогрев плоского тела становится односторонним и преобразуется в нестационарный режим теплопередачи через плоскую стенку.

Ключевые слова:

Плоская стенка, несимметричный прогрев, конвективный теплообмен, аналитические методы расчета температурных полей.

Несимметричный нагрев плоского тела конвективными потоками можно записать в виде следующей системы математических зависимостей [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_1 (t_{ж1} - t) \text{ при } x = 0, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_2 (t_{ж2} - t) \text{ при } x = \delta, \quad (3)$$

$$t = t_0 \text{ при } \tau = 0. \quad (4)$$

Целесообразно задачу (1)–(4) представить в безразмерном виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}, \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial X} = Bi_1 (1 - \theta) \text{ при } X = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = Bi_2 (\theta_{ж} - \theta) \text{ при } X = 1, \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 \text{ при } Fo = 0, \quad (8)$$

где $Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda}$; $Bi_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda}$ – числа Био; $X = \frac{x}{\delta}$ – без-

размерная координата; $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – безразмерное

время (число Фурье), $\theta = \frac{t}{t_{ж1}}$; $\theta_{ж} = \frac{t_{ж2}}{t_{ж1}}$; $\theta = \frac{t_0}{t_{ж1}}$ –

безразмерные температуры.

При $t_{ж1}=t_{ж2}$ и $\alpha_1=0$ процесс нагрева тела будет симметричным и на всём его протяжении тепловой центр остается в плоскости $X=0$.

Если же имеет место несимметричный подвод тепла, то тепловой центр в ходе процесса начинает перемещаться, т. е. пространственная координата X^* , соответствующая экстремуму производной

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$, оказывается некоторой функцией времени.

Характер функциональной зависимости $X^*=f(Fo)$ имеет важное теоретическое и практическое значение. В рассматриваемой статье предпринята попытка установить вид этой закономерности.

Аналитическое решение задачи (5)–(8) можно записать в виде суммы

$$\theta(X, Fo) = 1 + \frac{\theta_{ж} - 1}{Bi_1 \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1 \right)} + \frac{(\theta_{ж} - 1)X}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} + \vartheta(X, Fo), \quad (9)$$

где нестационарная составляющая $\vartheta(X, Fo)$ должна удовлетворять системе уравнений

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial X^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = Bi_1 \vartheta \quad \text{при } X = 0, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = Bi_2 \vartheta \quad \text{при } X = 1, \quad (12)$$

$$\vartheta = \vartheta(X) \quad \text{при } Fo = 0. \quad (13)$$

Здесь

$$\vartheta(X) = \theta_0 - \left[1 + \frac{\theta_{ж} - 1}{Bi_1 \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1 \right)} + \frac{(\theta_{ж} - 1)X}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \right].$$

Интегрируя (10)–(13), получим

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[\cos(\mu_n X) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin(\mu_n X) \right] e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (14)$$

где μ_n – собственные числа рассматриваемой задачи, определяются на основе характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu^2 - Bi_1 Bi_2}{\mu(Bi_1 + Bi_2)}.$$

В монографии [2] приведены подробные таблицы значений первых шести корней этого уравне-

ния при различных соотношениях между числами Bi_1 и Bi_2 . Также известен аналитический метод расчета корней данного уравнения [3].

Коэффициенты A_n рассчитываются по выражению

$$A_n = \frac{\int_0^1 \vartheta(X) \left[\cos(\mu_n X) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin(\mu_n X) \right] dX}{\int_0^1 \left[\cos(\mu_n X) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin(\mu_n X) \right] dX}.$$

Продифференцируем по координате X зависимость (9) с учетом соотношения (14). Тогда получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\theta_{ж} - 1}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} A_n \mu_n \left[\sin(\mu_n X) - \frac{Bi_1}{\mu_n} \cos(\mu_n X) \right] e^{-\mu_n^2 Fo}.$$

Приравняв эту производную к нулю, удастся составить уравнение для определения пространственной координаты X^* , соответствующей местонахождению теплового центра

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \mu_n \left[\sin(\mu_n X^*) - \frac{Bi_1}{\mu_n} \cos(\mu_n X^*) \right] e^{-\mu_n^2 Fo} = \\ = \frac{\theta_{ж} - 1}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Если ограничиться первым слагаемым в бесконечной сумме выражения (15), что допустимо для регулярной стадии исследуемого процесса, то

$$\sin(\mu_1 X^*) - \frac{Bi_1}{\mu_1} \cos(\mu_1 X^*) = \frac{\theta_{ж} - 1}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \cdot \frac{e^{-\mu_1^2 Fo}}{A_1 \mu_1}.$$

Представим комплекс $\frac{Bi_1}{\mu_1}$ в виде $\operatorname{tg} \beta = \frac{Bi_1}{\mu_1}$, т. е.

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{Bi_1}{\mu_1}.$$

Тогда согласно [4]

$$\sin(\mu_1 X^*) - \operatorname{tg} \beta \cos(\mu_1 X^*) = \frac{\sin(\mu_1 X^* - \beta)}{\cos \beta}.$$

Следовательно,

$$\sin(\mu_1 X^* - \beta) = \frac{(\theta_{ж} - 1) \cos \beta}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \cdot \frac{e^{-\mu_1^2 Fo}}{A_1 \mu_1},$$

и тогда

$$X^* = \frac{1}{\mu_1} \left\{ \beta + \arcsin \left[\frac{(\theta_{ж} - 1) \cos \beta}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \cdot \frac{e^{-\mu_1^2 Fo}}{A_1 \mu_1} \right] \right\}. \quad (16)$$

На основе зависимости (16) можно вычислить безразмерное число Fo , при котором тепловой центр сместится на внешнюю поверхность пластины, т. е. когда координата $X^*=1$. С этого момента времени процесс прогрева становится односторонним и преобразуется в нестационарный режим теплопередачи через плоскую стенку.

Для исследования начальной стадии процесса прогрева целесообразно решение задачи (10)–(13) представить в виде суммы решений двух симметричных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Видин Ю.В. Инженерные методы теплопроводности. – Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1992. – 96 с.
2. Михайлов М.Д. Нестационарные температурные поля в оболочках. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
3. Видин Ю.В., Иванов Д.И. Аналитический приближенный метод расчета нестационарной теплопередачи через цилиндри-

Выводы

Получена аналитическая зависимость для расчета пространственной координаты перемещения теплового центра в случае несимметричного конвективного подвода тепла к плоскому телу.

Разработанная математическая модель позволяет производить расчет времени, при котором процесс прогрева плоского тела становится односторонним и преобразуется в нестационарный режим теплопередачи через плоскую стенку.

ческую стенку // Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии: сб. науч. ст. Вып. 2 (10). – Киев: НПВК Триакон, 2012. – 404 с.

4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1965. – 608 с.

Поступила 01.04.2013 г.

UDC 536.24

MOTION OF THERMAL CENTER AT UNBALANCED HEATING OF FLAT BODY

Yu.V. Vidin, D.I. Ivanov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Using the analytical dependences the authors have developed the approximate method to calculate a space coordinate of thermal center motion at unbalanced heating of flat body with convective heat flows. In this case the thermal center at flat body heating with convective heat flows starts moving, the space coordinate corresponding to coordinate temperature derivative extremum turns out to be a certain time function. The type of space coordinate time dependence was determined. It is of great theoretical and practical importance. Using the proposed dependences it is possible to calculate the time moment when the flat body heating becomes one-side and it is converted into unsteady mode of heat transfer through the flat wall.

Key words:

Flat wall, unbalanced heating, convective heat, analytical methods for calculating the temperature fields.

REFERENCES

1. Vidin Yu.V. *Ingenernye metody teploprovodnosti* (Engineering methods of thermal conductivity). Krasnoyarsk, Krasnoyarskiy universitet, 1992. 96 p.
2. Mikhaylov M.D. *Nestatsionarnye temperaturnye polya v obolochkakh* (Non-steady temperature fields in shells). Moscow, Energiya, 1967. 120 p.
3. Vidin Yu.V., Ivanov D.I. Analiticheskiy priblizhenniy metod rascheta nestatsionarnoy teploperedachi cherez tsilindrichesku-

- yu stenku (Analytic approximate approach to calculation of non-steady heat transfer through the cylindric wall). *Sovremennaya nauka: idei, issledovaniya, rezultaty, tehnologii: sbornik nauchnykh statey*, 2 (10) (Contemporary science: ideas, researches, results, techniques. Iss. 2 (10)). Kiev: NPVK Triakon, 2012. 404 p.
4. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* (Mathematics manual for engineers and students). Moscow, Nauka, 1965. 608 p.