

А. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ БАРАБАНА КОТЛА

АННОТАЦИЯ Предложена модель процессов нестационарной осесимметричной теплопроводности в теплоизолированной цилиндрической стенке барабана котла. Рассмотрены случаи, отвечающие резкому изменению температуры, колебаниям температуры около заданного среднего значения, а также резкому изменению и последующим колебаниям температуры относительно нового среднего значения на внутренней поверхности барабана, которые охватывают типичные состояния, присущие установившимся и неустойчивым режимам эксплуатации котла. **Ключевые слова:** барабан котла, стенка барабана, теплопроводность, расчет, метод полудискретизации.

A. YEFIMOV, Yu. ROMASHOV, V. KAVERTSEV

SIMULATING THE PROCESSES OF NONSTATIONARY HEAT CONDUCTIVITY IN THE HEAT-INSULATED CYLINDRICAL WALL OF A BOILER DRUM

ABSTRACT This scientific paper is devoted to the investigation of nonstationary axisymmetric heat conductivity in the cylindrical heat-insulated wall of a boiler drum. Consideration was given to the cases of an abrupt change in the temperature of internal surface of the boiler, temperature fluctuations on the internal drum surface near the prescribed average value and also an abrupt change in the temperature of internal drum surface with subsequent fluctuations near a new average value embracing typical states peculiar for the stationary and nonstationary boiler operating modes. The investigations carried out showed that abrupt changes in the temperature of internal drum surface during some seconds may result in temperature fields, in which the temperature difference of internal and external surfaces is equal to a change in the temperature of internal surface. It takes the drum wall of 16 mm thick 30 seconds to align the temperature field after an abrupt increase in the temperature of internal surface. Harmonic temperature fluctuations on the internal surface create the temperature field in the drum wall with the temperature difference between the internal surface and the external surface a little bit higher than the half amplitude of vibrations in temperature. In the future, we plan to study mechanical stresses in the boiler drum wall caused by the internal pressure and nonstationary temperature fields considered in this scientific paper. In addition, we will study the influence produced by the temperature relationship for heat conductivity properties of the structural material on the nonuniform distribution of temperature field in the drum wall thickness.

Key words: boiler drum, drum wall, heat conductivity, computation, and the semidiscretization method.

Введение

Изучение процессов теплопроводности в стенках барабанов котлов в виде цилиндрических толстостенных ($d_{\text{нар}}/d_{\text{внутр}} \geq 1,2$, где $d_{\text{нар}}$ – наружный, а $d_{\text{внутр}}$ – внутренний диаметр) сосудов давления необходимо для оценки в них температурных напряжений, которые могут существенно ограничивать их работоспособность [1]. Моделированию процессов теплопроводности в стенках барабанов котлов в настоящее время уделяется много внимания [2–4]. Наибольший интерес представляют процессы нестационарной теплопроводности, закономерности которых влияют на оценку работоспособности барабанов и других сосудов давления в котельных установках на неустойчивых режимах эксплуатации, например при пусках из холодного состояния [4]. В связи с этим, различные научные исследования, посвященные изучению закономерностей процессов нестационарной теплопроводности в цилиндрических стенках барабанов котлов, являются актуальными.

Цель работы

Нестационарная теплопроводность в стенке барабана котла может иметь место, как при неустойчивых, так и при установившихся режимах эксплуатации. На неустойчивых режимах нестационарная теплопроводность обусловлена, например, резкими изменениями температуры, а на установившихся – колебаниями температуры вследствие погрешностей работы системы автоматического регулирования котла. Целью данного исследования является изучение нестационарного температурного поля в стенке теплоизолированного барабана котла при резком изменении температуры, при ее колебании около среднего значения, а также при резком изменении и последующих колебаниях относительно нового среднего значения температуры на внутренней поверхности стенки барабана. Рассматриваемые случаи охватывают типичные состояния, присущие установившимся и неустойчивым режимам эксплуатации котлов, что позволяет сделать выводы об общих закономерностях температурных полей в стенках барабанов котлов.

Математическая модель нестационарной теплопроводности теплоизолированной стенки барабана котла

Рассмотрим меняющиеся во времени t осесимметричные температурные поля в центральной части барабана котла с внутренним радиусом r_a , наружным радиусом r_b ; наружная поверхность барабана имеет тепловую изоляцию. Используем цилиндрические координаты $r_a \leq r \leq r_b$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$ и z , которые выбраны так, что ось z совпадает с осью цилиндрической части барабана. Тогда, с учетом принятых допущений и известных результатов теории теплопроводности [5], математическую модель нестационарной осесимметричной теплопроводности такого барабана представим в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \tag{1}$$

$$T(r_a, t) = T_a(t), \quad \frac{\partial T}{\partial r}(r_b, t) = 0, \tag{2}$$

$$T(r, 0) = T_0(r), \tag{3}$$

где $T = T(r, t)$ – нестационарное температурное поле; α – коэффициент теплопроводности; $T_a(t)$ – в общем случае меняющаяся во времени температура внутренней поверхности барабана; $T_0(r)$ – поле температуры в стенке барабана в начальный момент времени $t = 0$.

В начальный момент времени принимаем стационарное поле температуры стенки барабана

$$T_0(r) = \begin{cases} T_a(0), & r = r_a, \\ T_0, & r > r_a, \end{cases} \tag{4}$$

где $T_0 = \text{const}$ – установившаяся температура барабана, предшествующая начальному моменту времени.

Случаю резкого изменения температуры внутренней поверхности барабана на величину $\Delta T = \text{const}$, присущему, например пусковым, неустановившимся режимам отвечает зависимость

$$T_a(t) = T_0 + \Delta T. \tag{5}$$

Установившимся колебаниям температуры на внутренней поверхности барабана с амплитудой $T_a^{(a)}$ и периодом τ , соответствует зависимость

$$T_a(t) = T_0 + T_a^{(a)} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right). \tag{6}$$

При резком изменении температуры внутренней поверхности барабана и последующими ее колебаниями около нового среднего значения

$$T_a(t) = T_0 + \Delta T + T_a^{(a)} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right). \tag{7}$$

Таким образом, каждому режиму эксплуатации котла отвечают некоторые из зависимостей (5)–(7).

Методы решения задачи о нестационарной теплопроводности теплоизолированной стенки барабана котла

Для решения задач (1)–(7) о нестационарной теплопроводности стенки барабана котла, можно использовать хорошо известные численные методы [6]. Далее используем рассмотренный в работе [7] метод полудискретизации, в котором конечными разностями заменяют только лишь производные по пространственным координатам. В результате получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями относительно узловых значений искомой температуры. Для решения этой системы обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями можно использовать известные методы численного интегрирования дифференциальных уравнений с начальными условиями, например, в работах [8, 9]. Далее используем метод Мерсона [9]; полагая, что автоматический выбор шага интегрирования в этом методе позволит согласовывать шаг интегрирования по времени с шагом сетки.

Результаты решения задачи о нестационарной теплопроводности теплоизолированной стенки барабана котла

Все расчеты температурных полей в стенке барабана котла с использованием математической модели (1)–(7) выполнены для исходных данных:

$$r_a = 0,6 \text{ м}, \quad r_b = 0,616 \text{ м}, \quad \alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \\ T_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad n = 115,$$

где n – число узлов сетки.

На рис. 1 представлены результаты решения задачи (1)–(5) для случая, когда

$$\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \tag{8}$$

Результаты решения задачи теплопроводности (1)–(4) для случаев (6) и (7), в которых принято, что $T_a^{(a)} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\tau = 60 \text{ с}$, представлены на рис. 2.

Обсуждение результатов

Исследования теплопроводности в стенке барабана котла показывают, что резкие изменения температуры внутренней поверхности в течение нескольких секунд порождают в стенке температурные поля с разностью температур на внутренней и наружной поверхности, равной изменению температуры внутренней поверхности. Выравнивание температуры в стенке барабана толщиной 16 мм после резкого увеличения температуры внутренней поверхности происходит в течение 30 секунд.

При колебаниях температуры внутренней поверхности в стенке барабана котла возникают

температурные поля, у которых разность температур на внутренней и наружной поверхности составляют около половины амплитуды колебаний температуры. Таким образом, плавные изменения температуры внутренней поверхности вызывают в стенке барабана котла температурные поля с меньшим градиентом по сравнению с температурными полями при резких изменениях температуры внутренней поверхности.

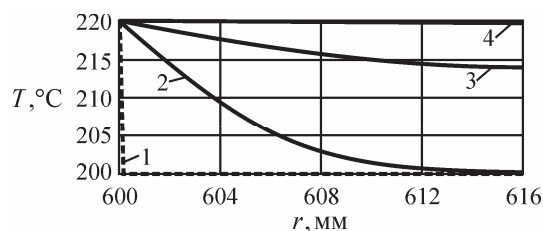


Рис. 1 – Температурные поля в моменты времени $t = 0$ (кривая 1), $t \cong 1$ с (кривая 2), $t \cong 10$ с (кривая 3) $t \cong 30$ с (кривая 4) в стенке барабана при резком увеличении температуры на внутренней поверхности

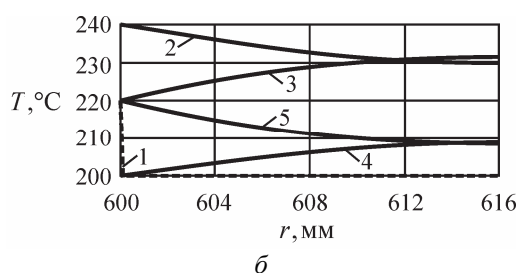
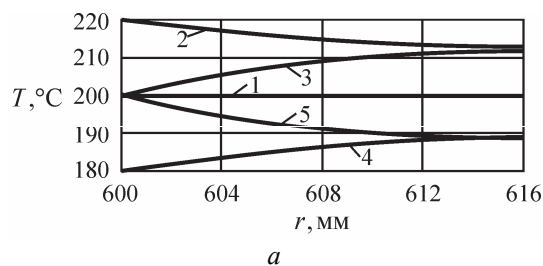


Рис. 2 – Температурные поля в разные моменты времени t в стенке барабана при колебаниях температуры на внутренней поверхности: а – около постоянного значения; б – после резкого изменения среднего значения; 1 – $t = 0$; 2 – $t \cong \tau/4$; 3 – $t \cong \tau/2$; 4 – $t \cong 3\tau/4$; 5 – $t \cong \tau$

Выводы

Выполнены исследования нестационарных температурных полей в теплоизолированной стенке барабана, которые отвечают типовым изменениям температуры внутренней поверхности барабана, характерным для установившихся и неустановившихся режимов эксплуатации котла. Показа-

но, что нестационарная теплопроводность в различные моменты времени может приводить к разнообразным распределениям температуры по толщине стенки барабана. В дальнейшем предполагается изучить механические напряжения в стенке барабана котла, вызываемые внутренним давлением и исследованными в данной работе нестационарными температурными полями. Также для последующих исследований представляет интерес изучение влияния температурной зависимости теплофизических свойств конструкционного материала на распределения по толщине стенки барабана нестационарных температурных полей. Изложенный в работе [7] метод полудискретизации применительно к решению задач нестационарной теплопроводности в сочетании с методом Мерсона [9] показал высокую эффективность и может быть рекомендован для последующего применения.

Список литературы

- 1 **Ефимов, А. В.** Температурные напряжения и оптимальное отношение внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок / **А. В. Ефимов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 9(1181). – С. 108–112. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.16.
- 2 **Mertens N.** Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up / **N. Mertens, F. Alobaid, R. Starkloff, B. Epple, H.-G. Kim** // Applied Energy. – 2015. – Vol. 144. – P. 250–260. – ISSN 0306-2619. – doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.065.
- 3 **Wang X.** Real-time temperature field reconstruction of boiler drum based on fuzzy adaptive Kalman filter and order reduction / **X. Wang, G. Wang, H. Chen, L. Zhang** // International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – Vol. 113. – P. 145–153. – ISSN 1290-0729. – doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.11.017.
- 4 **Taler J.** Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses / **J. Taler, P. Dzierwa, D. Taler, P. Harchut** // Energy. – 2015. – Vol. 92, Part 1. – P. 160–170. – ISSN 0360-5442. – doi: 10.1016/j.energy.2015.03.095.
- 5 **Holman J. P.** Heat transfer / **J. P. Holman**. – New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. – 758 p. – ISBN 978-0-07-352936-3.
- 6 **Tannehill J. C.** Computational fluid mechanics and heat transfer / **J. C. Tannehill, D. A. Anderson, R. H. Pletcher**. – Washington, DC: Taylor & Francis, 1997. – 792 p.
- 7 **Fletcher C. A. J.** Computational techniques for fluid dynamics I Fundamental and General Techniques / **C. A. J. Fletcher**. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, 1991. – 404 p.
- 8 **Butcher J. C.** A history of Runge-Kutta methods / **J. C. Butcher** // Applied numerical mathematics. – 1996. – Vol. 20. – P. 247–260.
- 9 **Hoffman J. D.** Numerical Methods for Engineers and Scientists / **J. D. Hoffman, S. Frankel**. – New York-Basel: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 825 p.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Yefimov, A., Romashov, Yu. and Kavertsev, V.** (2016), "Temperature Stresses and Optimum Ratio of the Inner and Outer Radii of the Cylindrical Parts of Pressure Vessels of Steam Generating Systems", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 108–112, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.16.
- 2 **Mertens, N., Alobaid, F., Starkloff, R., Epple, B. and Kim, H.-G.** (2015), "Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up", *Applied Energy*, Vol. 144, pp. 250–260, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.065.
- 3 **Wang, X., Wang, G., Chen, H. and Zhang, L.** (2017), "Real-time temperature field reconstruction of boiler drum based on fuzzy adaptive Kalman filter and order reduction", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 113, pp. 145–153, ISSN 1290-0729, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.11.017.
- 4 **Taler, J., Dzierwa, P., Taler, D. and Harchu, P.** (2015), "Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses", *Energy*, Vol. 92, Part 1, pp. 160–170, ISSN 0360-5442, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.095.
- 5 **Holman, J. P.** (2010), *Heat transfer*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, ISBN 978-0-07-352936-3.
- 6 **Tannehill, J. C., Anderson, D. A. and Pletcher, R. H.** (1997), *Computational fluid mechanics and heat transfer*, Taylor & Francis, Washington, DC.
- 7 **Fletcher, C. A. J.** (1988, 1991), *Computational techniques for fluid dynamics 1 Fundamental and General Techniques*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- 8 **Butcher, J. C.** (1996), "A history of Runge-Kutta methods", *Applied numerical mathematics*, Vol. 20, pp. 247–260.
- 9 **Hoffman, J. D. and Frankel, S.** (2001), *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, Marcel Dekker Inc., New York-Basel.

Сведения об авторах (About authors)

Ефимов Александр Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой парогенераторостроения; г. Харьков, Украина.

Yefimov Alexander – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Steam Generator Building Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkov, Ukraine.

Ромашов Юрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры парогенераторостроения, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, профессор кафедры прикладной математики; г. Харьков, Украина; e-mail: yu.v.romashov@gmail.com, ORCID 0000-0001-8376-3510.

Romashov Yurii – Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of the Steam Generator Building Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the applied mathematics department, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkov, Ukraine.

Каверцев Валерий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры парогенераторостроения; г. Харьков, Украина.

Kavertsev Valerii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Docent of the Steam Generator Building Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkov, Ukraine.

Please cite this article as:

Ефимов, А. В. Моделирование процессов нестационарной теплопроводности в теплоизолированной цилиндрической стенке барабана котла / **А. В. Ефимов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 37–40. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.05.

Please cite this article as:

Yefimov, A., Romashov, Yu. and Kavertsev, V. (2017), "Simulating the Processes of Nonstationary Heat Conductivity in the Heat-Insulated Cylindrical Wall of a Boiler Drum", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1233), pp. 37–40, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.05.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Єфімов, О. В. Моделювання процесів нестационарної теплопровідності в теплоізолюваній циліндричній стінці барабану котла / **О. В. Єфімов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 37–40. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.05.

АНОТАЦІЯ Запропонована модель процесів нестационарної осесиметричної теплопровідності в теплоізолюваній зовні циліндричній стінці барабана котла. Розглянуто випадки при різкій зміні температури, при її коливанні близько середнього значення, а також при різкій зміні і наступних коливаннях щодо нового середнього значення температури на внутрішній поверхні барабана, які охоплюють типові стани, притаманні усталеним і неусталеним режимам експлуатації котла.

Ключові слова: барабан котла, стінка барабана, теплопровідність, температурне поле, метод напівдискретизації.

Поступила (received) 09.02.2017