

А. М. Абдуллин

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАНТНЫХ КАМЕР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

Ключевые слова: тепловой поток, спектр излучения, трубчатый экран, огнеупорная футеровка, коэффициент тепловой эффективности.

Статья содержит результаты численного моделирования сложного теплообмена в радиантной камере трубчатой печи БПК-6К паровой конверсии природного газа при косвенно направленном режиме теплопередачи. Радиантная камера состоит из двух секций, расположенных симметрично относительно однорядного трубчатого змеевика с вертикальным расположением реакционных труб. Боковые стены камеры футерованы огнеупорным материалом (шамот ША), трубчатый экран обогревается веерными горелками ГВН настольного пламени, расположенных в два ряда на боковых стенах радиантной камеры. Топливом является природный газ. Метод исследования основан на численном решении системы двухмерных интегро-дифференциальных уравнений радиационной газовой динамики, замкнутой уравнениями (к-ε)-модели турбулентности. Перенос тепла излучением моделируется в рамках S_4 -приближения метода дискретных ординат. Радиационные свойства продуктов полного сгорания природного газа (водяной пар H_2O и двуокись углерода CO_2) описывается моделью широкой полосы, учитывающей основные спектральные полосы поглощения: 1,5 мкм; 2,7 мкм; 4,3 мкм; 6,3 мкм; 10 мкм и 15 мкм. Газодинамическая часть задачи решается в естественных ($u-v$)-переменных на так называемой «шахматной» конечно-разностной сетке (алгоритм SIMPLE). Расчеты выполнены в сером приближении и с учетом селективности радиационных свойств огнеупора. Приведены распределения по спектру усредненных по площади падающих, поглощенных и результирующих тепловых потоков к трубчатому экрану, а также поле скоростей продуктов сгорания. Показано, что расчет в сером приближении для радиационных свойств ограждающих топку поверхностей дает искаженное спектральное распределение тепловых потоков, особенно в ближней инфракрасной области. Влияние селективности излучения на локальные характеристики теплообмена в топочных камерах является значительным. Это свидетельствует о необходимости совместного учета селективности радиационных свойств топочной среды и участвующих в теплообмене ограждающих поверхностей.

А. М. Abdullin

INFLUENCE OF RADIATION PROPERTIES OF REFRACTORY LINING ON THERMAL CHARACTERISTICS OF RADIANT CHAMBERS OF TECHNOLOGICAL TUBULAR FURNACES

Key words: heat flux, radiation spectrum, tubular screen, refractory lining, thermal efficiency coefficient.

The article contains the results of numerical modeling of complex heat exchange in the radiant chamber of the BPK-6K tubular furnace for steam reforming of natural gas under indirectly directed heat transfer mode. The radiant chamber consists of two sections located symmetrically relative to a single-row tubular coil with vertical reaction tubes. The side walls of the chamber are lined with refractory material (chamotte SHA), the tubular screen is heated by fan burners GVN of a flat flame, located in two rows on the side walls of the radiant chamber. The fuel is natural gas. The research method is based on the numerical solution of a system of two-dimensional integro-differential equations of radiative gas dynamics, closed by the equations of the (k-ε)-turbulence model. Heat transfer by radiation is modeled within the framework of the S_4 -approximation of the discrete ordinate method. The radiation properties of the products of complete combustion of natural gas (water vapor H_2O and carbon dioxide CO_2) are described by a broadband model taking into account the main spectral absorption bands: 1.5 μm; 2.7 μm; 4.3 μm; 6.3 μm; 10 μm and 15 μm. The gas-dynamic part of the problem is solved in natural (u-v)-variables on the so-called "chessboard" finite-difference grid (SIMPLE algorithm). The calculations are performed in the gray approximation and taking into account the selectivity of the refractory radiation properties. The spectral distributions of the area-averaged incident, absorbed and resulting heat fluxes to the tubular screen, as well as the velocity field of the combustion products are presented. It is shown that the calculation in the gray approximation for the radiation properties of the surfaces enclosing the furnace gives a distorted spectral distribution of heat fluxes, especially in the near infrared region. The influence of radiation selectivity on local heat exchange characteristics in combustion chambers is significant. This indicates the need for joint consideration of the radiation selectivity of the combustion environment and the enclosing surfaces involved in heat exchange.

Введение

Трубчатые печи являются одними из основных оборудований технологических установок нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Важнейшим элементом трубчатой печи, в наибольшей степени определяющим эффективность и надежность функционирования

всего агрегата, является радиантная (топочная) камера.

В топках энергетических и технологических установок протекают сложные взаимосвязанные физико-химические процессы: радиационный теплообмен в селективно излучающей и рассеивающей среде, перенос тепла конвекцией в турбулентном потоке, теплопередача через слой

загрязнений к продукту, аэродинамика топочных газов, факельный процесс горения топлива и т.д.

Определяющим видом теплообмена в энергетических топках является лучистый теплообмен, доля которого в общем тепловом балансе обычно составляет более 90%. Инженерные расчеты теплообмена в топках в основном выполняются по нормативным и зональным методам [1-3]. Эти методы постоянно совершенствуются, например, в зонально-узловом методе совмещается позонный расчет лучистого теплообмена и расчет аэродинамики топочных газов, основанный на численном решении дифференциальных уравнений газовой динамики [4].

Строгое математическое описание процессов сложного теплообмена в топках возможно на базе системы интегро-дифференциальных уравнений радиационной газовой динамики [5-6], когда теплообмен излучением учитывается в уравнении энергии в виде дивергенции плотностей лучистых потоков, определяющей потерю (или приобретение) тепла в единице объема топочной среды. Газодинамическая часть задачи решается методом численного интегрирования уравнений движения и переноса массы, замкнутых уравнениями одной из моделей турбулентности [7].

Объект исследования и математическая модель

Объектом исследования является радиантная камера трубчатой печи паровой конверсии природного газа БПК-6К. Радиантная камера состоит из двух секций, расположенных симметрично относительно однорядного трубчатого змеевика с вертикальным расположением реакционных труб. Радиантная камера футерована огнеупорными материалами (шамот ША), трубчатый экран обогревается веерными горелками ГВН настольного пламени, расположенных в два ряда на боковых стенах радиантной камеры. Поэтому в топке печи реализуется косвенно направленный режим теплообмена, когда тепловой поток к трубчатому экрану формируется не только излучением и конвекцией топочной среды, но и от раскаленной поверхности боковой стены радиантной камеры.

Анализ спектральных радиационных характеристик топочной среды и ограждающих топку поверхностей (футеровки и трубчатого экрана) свидетельствуют о необходимости учета селективности излучения в тепловых расчетах топочных камер. На рис.1 приведены спектры излучения огнеупорного состава (шамот ША) [8,9] и топочной среды при сжигании газообразного топлива [10]. Спектр излучения продуктов полного сгорания топлива (в основном двуокись углерода и водяной пар) является линейчатым, но в рамках модели широкой полосы эти линии объединяются в спектральные полосы, локализованные на длине волны $\lambda=1,5\text{мкм}$, $2,7\text{мкм}$, $6,3\text{мкм}$, 10мкм спектра излучения H_2O и $\lambda=2,7\text{мкм}$, $4,3\text{мкм}$, 15мкм двуокиси углерода CO_2 . Эти спектральные полосы разделены так называемыми окнами прозрачности (0-1,5мкм),

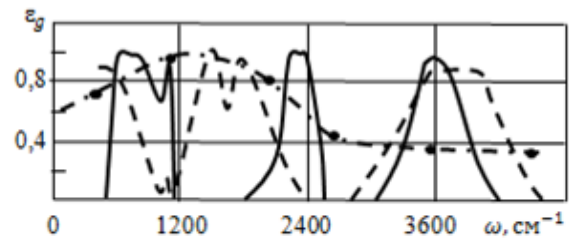


Рис. 1 – Спектр излучения шамота ША (штрихпунктирная линия), паров воды H_2O (штриховая линия), двуокиси углерода CO_2 (сплошная линия)

Fig. 1 – Emission spectrum of chamotte ША (dash-dotted line), water vapor H_2O (dashed line), carbon dioxide CO_2 (solid line)

(1,5-2,7мкм) и (2,7-4,3мкм), в которых собственное излучение от раскаленной поверхности боковых стенок и отраженный от них лучистый поток без существенных потерь достигает экранной поверхности.

Спектр излучения огнеупорной футеровки является сплошным, однако коэффициент излучения ε_g огнеупора зависит от длины волны излучения. Если принять среднюю температуру раскаленной поверхности равной 1300К, по закону спектрального смещения Вина максимальной интенсивности излучения абсолютно черного тела соответствует длина волны $\lambda = b/T = 2,23\text{мкм}$.

Это значение длины волны излучения попадает в диапазон спектра от $\lambda=2\text{мкм}$ ($\omega=5000\text{см}^{-1}$) до $\lambda=3\text{мкм}$ ($\omega=3300\text{см}^{-1}$), где коэффициент излучения большинства огнеупорных материалов резко снижается более чем в два раза. В то же время в этой области спектра радиационные тепловые потоки имеют наибольшие значения (рис.3). Это отрицательно сказывается на тепловосприимчивости трубчатого экрана.

Лучистый теплообмен в топочной камере рассматривается в рамках S_4 -приближения метода дискретных ординат [11,12]:

$$\mu_m \frac{\partial I_{m,\lambda}}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_{m,\lambda}}{\partial y} = \alpha_\lambda I_{b\lambda} - (\alpha_\lambda + \beta) I_{m,\lambda} + \frac{\beta}{4\pi} \sum_{m=1}^{N_0} I_{m,\lambda} w_m. \quad (1)$$

Здесь $I_{m,\lambda}$ – спектральная интенсивность излучения, μ_m, ξ_m – угловые координаты, N_0 – число дискретных направлений, $I_{b\lambda}$ – функция Планка, α_λ – спектральный коэффициент линейного поглощения, β – коэффициент рассеяния топочной среды.

Локальные значения температуры продуктов сгорания и ограждающих камеру поверхностей определяются из уравнения энергии:

$$c_p \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \text{div}[(\lambda + \lambda_T) \text{grad} T] + Q_V + \text{div} \mathbf{q}_p, \quad (2)$$

где λ, λ_T – коэффициенты молекулярного и турбулентного переноса тепла, $Q_V, [\text{Вт}/\text{м}^3]$ – объемная плотность тепловыделения в области пламени. Плотность результирующего лучистого

потока определяется суммированием по всем спектральным полосам и дискретным направлениям:

$$q_p = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^{N_0} I_{m,\lambda_k} w_m.$$

Аэродинамика топочных газов описывается системой двумерных стационарных уравнений движения и переноса массы совместно с уравнениями $(k - \varepsilon)$ – модели турбулентности:

$$\rho u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \text{div}[\Gamma_\Phi \text{grad} \Phi] + S_\Phi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\Phi = (u, v, k, \varepsilon)$ – обобщенная переменная, Γ_Φ – обобщенный коэффициент переноса, S_Φ – источниковый член.

Температура огнеупорной футеровки определяется из уравнения теплового баланса:

$$\frac{\lambda_\Phi}{d} (T_\Phi - T_0) = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_n - (\vec{q}_p \vec{n}), \quad (5)$$

где λ_Φ, d – коэффициент теплопроводности и толщина футеровки, T_0 – температура наружной поверхности. Градиент температуры в пределах пограничного слоя вычисляется по методу «пристеночных» функций [13]. Температура футеровки и тепловые потоки к ней заранее неизвестны, поэтому уравнение (5) решается методом последовательных приближений. Подробный алгоритм численного решения системы уравнений (1)-(5) с соответствующими граничными условиями изложен в [14,15].

Результаты моделирования

Результаты расчетов представлены на рис. 2. При расположении горелок на боковых стенах топочной камеры область течения продуктов сгорания разделяется на две части. Область обратного тока располагается между трубчатым экраном и высокотемпературной зоной прямого тока. Имея более низкую температуру, эта область создает эффект теплового экрана для лучистых потоков, исходящих от пламени и раскаленной поверхности футеровки боковой стены, ухудшая условия теплопередачи трубчатому экрану. Однако энергия, поглощенная боковой стеной камеры за счет конвекции и радиации от пламени, излучается обратно в топочный объем и в окнах прозрачности спектра достигает трубчатого экрана, ослабляя таким образом в некоторой степени эффект экранирования.

При реализации косвенно направленного режима теплопередачи практический интерес представляет механизм влияния селективности излучения на теплообмен и анализ трансформации спектрального состава излучения при взаимодействии с трубчатым экраном и ограждающей камеру футеровкой. Спектральный состав отраженного и поглощенного излучения определяется составом падающего излучения и спектральными радиационными характеристиками тепловоспринимающих поверхностей. Сравнение спектральных распределений плотностей поглощенного и

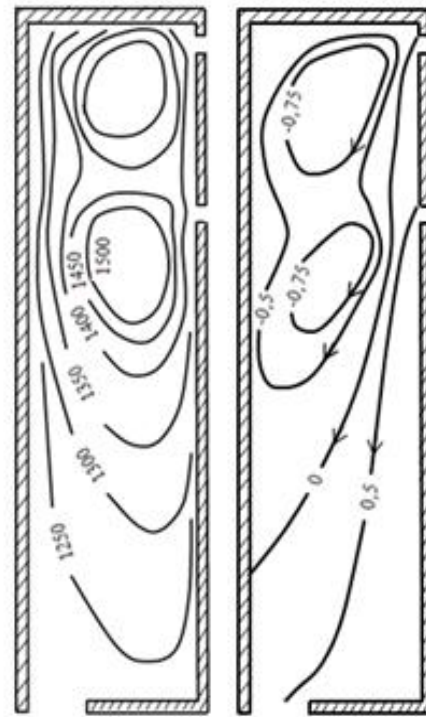


Рис. 2 – Изотермы и линии тока. Ширина топки $H = 1\text{ м}$, $\psi/\psi_0 \cdot \psi_0 = 0,173 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$
Fig. 2 – Isotherms and flow lines. Furnace width $H=1\text{ m}$, $\psi/\psi_0 \cdot \psi_0 = 0,173 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

результатирующего потоков к трубчатому экрану (рис. 3), выполненные в сером приближении и с учетом селективности радиационных характеристик футеровки, показывает, что в обоих случаях в ближней инфракрасной области наблюдаются пики и провалы в распределении результирующих тепловых потоков. Неравномерное распределение тепловых потоков обусловлено наличием «окон» прозрачности в спектре излучения топочной среды и относительно низким значением коэффициента излучения огнеупора в ближней инфракрасной области. Рост коэффициента излучения огнеупора с увеличением длины волны λ способствует более равномерному распределению тепловых потоков по спектру. В этой области спектра оба приближения (серое и селективное) дают примерно одинаковые величины тепловых потоков. В то же время пренебрежение селективностью радиационных свойств огнеупора в ближней инфракрасной области спектра приводит к более высоким значениям тепловых потоков.

Анализ спектрального распределения коэффициента тепловой эффективности ψ свидетельствует о значительном его изменении по спектру. Наибольшее значение $\psi = 0,55 \div 0,44$ наблюдается в интервале спектра $\lambda = 1 \div 3 \text{ мкм}$ как в сером приближении, так и в расчетах с учетом селективности радиационных свойств огнеупора. Наименьшее значение $\psi = 0,30 \div 0,27$ имеет место в дальней инфракрасной области, несмотря на то, что в этой области спектра коэффициент излучения огнеупорной футеровки имеет достаточно высокие значения. Это свидетельствует об определяющей роли топочного объема в формировании тепловых потоков к трубчатому экрану. Обращает внимание

отрицательный коэффициент тепловой эффективности в окнах прозрачности спектра на длине волны $\lambda = 2 \text{ мкм}$ и $3,5 \text{ мкм}$ (рис.4), что является следствием снижения коэффициента излучения огнеупора в этой области спектра и интенсивным собственным излучением экранной

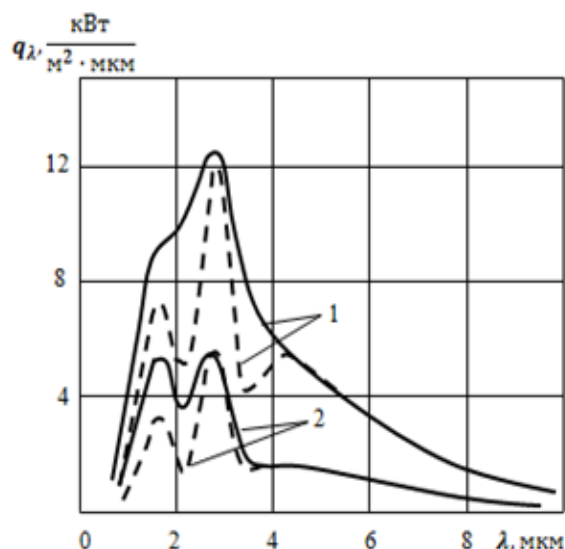


Рис. 3 – Усредненные по площади спектральные плотности тепловых потоков к трубчатому экрану. Обозначения: 1 – поглощенный, 2 – результирующий поток. Сплошная линия – серое приближение, штриховая линия – расчет с учетом селективности радиационных свойств огнеупора

Fig. 3 – Averaged over the area spectral densities of heat flows to the tubular screen. Designations: 1 – absorbed, 2 – resulting flow. Solid line – gray approximation, dashed line – calculation taking into account the selectivity of the radiation properties of the refractory

Заключение

Проведенный расчетно-теоретический анализ показывает, что расчет сложного теплообмена в рамках серого приближения для радиационных свойств ограждающих топку поверхностей дает искаженное спектральное распределение тепловых потоков, особенно в ближней инфракрасной области. Влияние селективности излучения на локальные характеристики теплообмена в топочных камерах является значительным. Это свидетельствует о необходимости совместного учета селективности радиационных свойств топочной среды и участвующих в теплообмене ограждающих поверхностей.

Литература

1. Нормативная методика расчета трубчатых печей. РТМ 26-02-40-77. ВНИИНЕФТЕМАШ, 1978. 645с.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Энергия, Москва, 1973. 295с.

поверхности. В рамках серого приближения коэффициент тепловой эффективности положителен по всему спектру и значительно превышает его значение, найденное с учетом селективности радиационных свойств огнеупора.

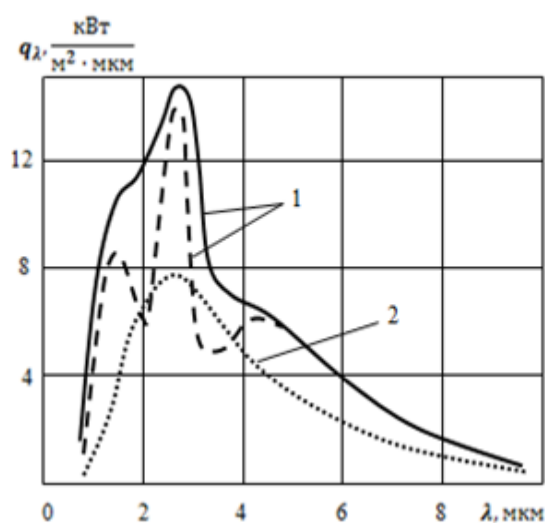


Рис. 4 – Усредненные по площади спектральные плотности тепловых потоков к трубчатому экрану. Обозначения: 1 – падающий поток, 2 – поток собственного излучения трубчатого экрана. Сплошная линия – серое приближение, штриховая линия – расчет с учетом селективности радиационных свойств огнеупора

Fig. 4 – Averaged over the area spectral densities of heat flows to the tubular screen. Designations: 1 – incident flow, 2 – flow of the tubular screen's own radiation. Solid line – gray approximation, dashed line – calculation taking into account the selectivity of the refractory's radiation properties

3. О.Ю.Кулешов, В.М.Седелкин. *Известия вузов: Проблемы энергетики*, №5 –6, С.47-54 (2011).
4. Г.К.Маликов, В.Г.Лисиенко, Ю.К.Маликов. *Теплофиз. высоких т-р*, 23, 6,1103-1111 (1985).
5. Б.Н.Четверушкин, *Математическое моделирование задач динамики излучающего газа*. М.: Наука, 1985. 304с.
6. Н.А.Рубцов, *Теплообмен излучением в сплошных средах*. Новосибирск: Наука, 1984. 278с.
7. С.Патанкар, *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150с.
8. Ф.А.Гарифуллин, М.А.Таймаров, *Спектральные исследования коэффициентов излучения огнеупоров*. НТО по х/д №133-85, Казань, КХТИ, 1985. 28с.
9. Ф.А.Гарифуллин, М.А.Таймаров, *Интегральные исследования коэффициентов излучения огнеупоров*, НТО по х/д №133-85, Казань, КХТИ,1986. 80с.
10. D.K.Edwards. *Molecular gas band radiation*. Advances in Heat Transfer, 12, New York, 1976. p. 115-193.
11. W.A.Fiveland. *J. Heat Transfer*, 106, 4, 699-706 (1984).
12. J.S.Truelove. *J. Heat Transfer*, 109, 4, 1048-1051 (1984).
13. И.А.Белов, Н.А.Кудрявцев, *Теплоотдача и сопротивление пакетов труб*. Л.:Энергоатомиздат, 1987. 223с.

14. А.М.Абдуллин. *Известия вузов: Проблемы энергетики*, №11–12, С.30-39 (2011).
15. А.М.Абдуллин. *Материалы III междунар. конф. «Современные проблемы теплофизики и энергетики»*, Москва, МЭИ, 19-23 октября 2020. С. 9-10.

References

1. *Standard calculation method for tubular furnaces*. RTM 26-02-40-77. VNIINEFTEMASH, 1978. 645 p.
2. *Thermal calculation of boiler units. Standard method*. Energy, Moscow, 1973. 295 p.
3. O.Yu.Kuleshov, V.M.Sedelkin. *News of universities: Problems of energy*, No. 5-6, pp. 47-54 (2011).
4. G.K.Malikov, V.G.Lisienko, Y.K.Malikov. *High-temperature Thermal Physics*, **23**, 6, 1103-1111 (1985).
5. B.N.Chetverushkin, *Mathematical Modeling of Problems of Radiating Gas Dynamics*. М.: Nauka, 1985. 304p.
6. N.A.Rubtsov, *Radiative Heat Transfer in Continuous Media*. Novosibirsk: Nauka, 1984. 278 p.
7. S.Patankar, *Numerical Methods for Solving Heat Transfer and Fluid Dynamics Problems*. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 150 p.
8. F.A.Garifullin, M.A.Taimarov, *Spectral studies of refractory radiation coefficients*. Scientific and technical report №133-85, Kazan Technological University, 1985. 28 p.
9. F.A.Garifullin, M.A.Taimarov, *Integral studies of refractory radiation coefficients*. Scientific and technical report №133-85, Kazan Technological University, 1986. 80 p.
10. D.K.Edwards, *Molecular gas band radiation*. Advances in Heat Transfer, **12**, New York, 1976. p. 115-193.
11. W.A.Fiveland. *J. Heat Transfer*, **106**, 4, 699-706 (1984).
12. J.S.Truelove. *J. Heat Transfer*, **109**, 4, 1048-1051 (1984).
13. I.A.Belov, N.A.Kudryavtsev, *Heat Transfer and Resistance of Tube Packages*. L.:Energoatomizdat, 1987. 223p.
14. А.М.Абдуллин, *News of universities: Problems of energy*, №11–12, P.30-39 (2011).
15. А.М.Абдуллин, *Proceedings of the III international. conf. "Modern problems of thermal physics and power engineering*, Moscow, MPEI, October 19-23, 2020. P. 9-10.

© **А. М. Абдуллин** – доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий Нижнекамского химико-технологического института (филиал Казанского национального исследовательского технологического университета), Нижнекамск, Россия, amabdullin@mail.ru.

© **А. М. Abdullin** – Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises, Nizhnekamsk Chemical and Technological Institute (branch of Kazan National Research Technological University), Nizhnekamsk, Russia, amabdullin@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию –19.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 14.05.25.