

Кленов Дмитрий Викторович – e-mail: dmklenov@yandex.ru; тел.: +79172092447; аспирант.

Светлова Марина Константиновна – e-mail: marinasv1992@gmail.com; преподаватель.

Львов Петр Алексеевич – Энгельское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева; e-mail: peter.lvov@gmail.com; 413119, Саратовская обл., г. Энгельс-19, квартал 5, 14; к.т.н.; нач. отдела.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; 24, Rabochaya street, Saratov, 410028, Russia; dr. of eng. sc.; leading researcher.

L'vov Alexey Arlenovich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: alvova@mail.ru; 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russia; dr. of eng. sc.; professor.

Klenov Dmitry Viktorovich – e-mail: dmklenov@yandex.ru; phone: +79172092447; post-graduate student.

Svetlova Marina Konstantinovna – e-mail: marinasv1992@gmail.com; lecturer.

L'vov Peter Alexeevich – OJSC “Signal” Engels Design Bureau named after A.I. Glukharev; e-mail: peter.lvov@gmail.com; 413119, block 5, 14, Engels-19, Saratov Region, Russia; cand. of eng. sc. department head.

УДК 681.5

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-100-110

А.Л. Ляшенко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПАРОВОГО КОТЛА ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Рассмотрена необходимость регулирования питания котельных агрегатов, регулирования давления в барабане котла и поддержания технологических параметров на заданном уровне, а также возможные аварийные ситуации, которые могут возникнуть в случае нарушения технологических процессов. В качестве объекта управления рассмотрен паровой котел БКЗ-75-39 ГМА, установленный на теплоэлектростанции. В статье представлено описание парового котла. Для мониторинга параметров паровой котельной установки теплоэлектростанции, предлагается рассмотреть котельный агрегат как объект с распределенными параметрами. Для разработки математической модели объекта управления была рассмотрена функциональная схема данного котла с основным оборудованием и технологическими потоками жидкостей и газов. Разработана методика моделирования объектов данного класса как объектов с распределенными параметрами. Рассмотрение процессов, протекающих в экранных трубах, позволило составить дифференциальные уравнения движения, описывающие течение одно- и двухфазной рабочей среды в трубах парогенератора. Полученные уравнения были записаны с соблюдением условия сохранения баланса массы, энергии и количества движения. Разработанная методика математического моделирования распространения тепла в экранных трубах котельного агрегата позволила составить математическую модель для рассматриваемого объекта. Данная математическая модель получилась достаточно сложной, и решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным. Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным. Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение. С его помощью были рассчитаны значения температур в контрольных точках. Значения, полученные путем моделирования, совпали с пока-

заниями датчиков, которые установлены на реальном объекте. Представленная математическая модель позволит разработать тренажерный комплекс для подготовки оперативного персонала теплоэлектростанции, позволяющий моделировать различные режимы работы котельных установок типа БКЗ.

Паровой котёл; объекты с распределёнными параметрами; дифференциальные уравнения; моделирование; системный анализ; управление; контроль; диагностика; обработка информации.

A.L. Liashenko

MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL PROCESSES IN A HEAT-ELECTRIC POWER STATION STEAM BOILER

The necessity of regulating the supply in boiler units, regulating the pressure in the boiler drum and maintaining the technological parameters at a given level, as well as possible emergencies that may arise in case of violation of technological processes are considered. The BKZ-75-39 GMA steam boiler installed at a thermal power plant is considered as an object of control. The article describes the steam boiler. To monitor the parameters of the steam boiler at a heat electric power station, it is proposed to consider the boiler unit as an object with distributed parameters. To develop a mathematical model of the control object, the functional scheme of this boiler with the main equipment and technological flows of liquids and gases was considered. A method for modeling objects of this class as objects with distributed parameters has been developed. Consideration of the processes occurring in the screen tubes made it possible to draw up differential equations of motion describing the flow of one- and two-phase working medium in the tubes of the steam generator. The obtained equations were written in compliance with the conditions for maintaining a balance of mass, energy and momentum. The developed method of mathematical modeling of heat distribution in the screen tubes of the boiler unit made it possible to compose a mathematical model for the object in question. This mathematical model turned out to be quite complex, and it is impossible to solve the resulting system of partial differential equations analytically (select the transfer function). For the numerical analysis of the control object under consideration, a discrete model of equations and a computational algorithm were compiled. In the process of compiling discrete models, the problems of "matching" the boundary conditions, ensuring the stability of the computational scheme were solved, and discretization steps were chosen according to spatial variables. For computer simulation was specially developed software. With it, we calculated the temperature values at the control points. The values obtained by simulation, coincided with the readings of sensors that are installed on a real object. The presented mathematical model will make it possible to develop a training complex for the training of operating personnel at a thermal power station, which allows simulating various modes of operation of the BKZ type boiler installations.

Steam boiler; objects with distributed parameters; differential equations; modeling; system analysis; control; monitoring; diagnostics; information processing.

Введение. По уровню автоматизации теплоэнергетика занимает одно из ведущих мест среди других отраслей промышленности. Теплоэнергетические установки характеризуются непрерывностью протекающих в них процессов. При этом выработка тепловой и электрической энергии в любой момент времени должна соответствовать потреблению (нагрузке). Это сопровождается непрерывным контролем большого количества различных технологических процессов, одним из которых является регулирование питания котельного агрегата [2].

Регулирование питания котельных агрегатов и регулирование давления в барабане котла главным образом сводится к поддержанию материального баланса между отводом пара и подачей воды. Параметром, характеризующим баланс, является уровень воды в барабане котла. Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. При повышении давления, снижение уровня ниже допустимых пределов, может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережог [3].

Повышение уровня также ведет к аварийным последствиям, так как возможен заброс воды в пароперегреватель, что вызовет выход его из строя. В связи с этим, к точности поддержания заданного уровня предъявляются очень высокие требования. Качество регулирования питания также определяется равенством подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера [5].

Постановка задачи. Основным оборудованием, вырабатывающим тепловую энергию в промышленных и отопительных установках являются парогенераторы и водяные котлы. Промышленные предприятия потребляют огромное количество тепла на технологические нужды, вентиляцию, отопление и горячее водоснабжение. Тепловая энергия в виде пара и горячей воды вырабатывается теплоэлектростанциями, промышленными районами отопительными котельными. Работа с высокими технологиями и огромная ответственность персонала теплоэлектростанций требуют, чтобы учитывались даже маловероятные риски возникновения аварии. Для этого проводится постоянный мониторинг состояния технологического оборудования. Диагностирование физического состояния паровой котельной установки позволяет выявить возможные нарушения функций безопасности, вызванные отказами оборудования и систем, оценить приоритетность восстановления этих функций и определить оптимальную последовательность действий оператора, направленных на обеспечение целостности барьеров безопасности и перевод котла в нормальный режим работы.

Для мониторинга параметров паровой котельной установки теплоэлектростанции, предлагается рассмотреть котельный агрегат как объект с распределенными параметрами.

В качестве примера был рассмотрен паровой котел БКЗ-75-39 ГМА.

Описание технологического процесса. Паровой котел БКЗ-75-39 ГМА представленный на рис. 1.

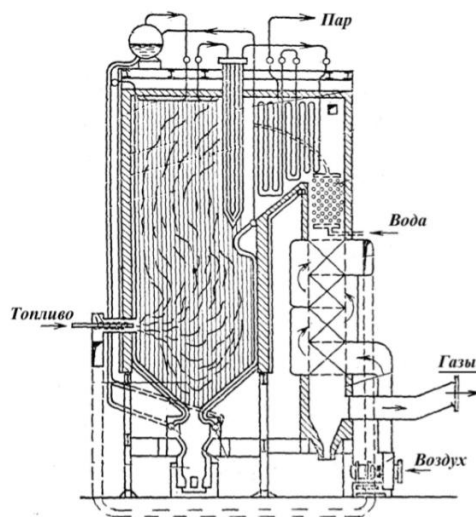


Рис. 1. Схема паровой котельной установки

Паровой котел БКЗ-75-39 ГМА предназначен для получения перегретого пара. Котел барабанный, с естественной циркуляцией, с камерным сжиганием топлива. В котле происходит нагрев воды, ее испарение и перегрев образовавшегося пара. В качестве топлива используется природный газ. Котел предназначен для

работы в закрытых помещениях. Паропроизводительность котла 75 т/час, (при реконструкции предусматривается увеличение производительности до 90 т/час) абсолютное давление пара 3,9 МПа и температура 440 °С, температура питательной воды 145 °С. [15, 19].

Горение топлива происходит в вертикальной топочной камере, образованной экранными трубами. Верхние и нижние концы труб введены в сборные коллекторы. На фронтальной стенке топки на двух ярусах расположены по три газо-мазутных горелки типа ГМУ-10, с помощью которых сжигается топливо. В обогреваемых газами трубах, образующих топку и конвективную шахту, образуется насыщенный водяной пар. Пароводяная смесь поступает в верхние коллекторы, а из них в барабан-паросборник и выносные сепараторы-циклоны. В барабанах и циклонах происходит отделение пара от воды. После барабанов и циклонов пар направляется в пароперегреватель, где он перегревается горячими дымовыми газами, а затем идет потребителю. Питание котла водой производится через экономайзер, в котором вода предварительно подогревается. Горячий воздух необходимый для горения, подается в топку через горелки из воздухоподогревателя, обогреваемого горячими дымовыми газами. Движение дымовых газов по трактам котла осуществляется за счет работы дымососа ДН-18. Подача воздуха производится высоконапорным вентилятором ВДН-20 ПУ. Воздух поступает с напора вентилятора на первую ступень воздухоподогревателя, а после первой ступени воздухоподогревателя направляется во вторую ступень воздухоподогревателя, где нагревается до 200 °С и подается к горелкам котла (в топочную камеру). Продукты сгорания с температурой 1180 °С поступают на пароперегреватель. Затем с температурой 520 °С, давлением 10 мм. в. ст. и 2 % содержанием кислорода направляются к экономайзеру, на входе которого температура 300 °С и давление 70 мм. в. ст. Продукты сгорания после воздухоподогревателя с температурой 130 °С направляются в дымосос. Природный газ (8400 м³/ч) поступает к горелкам по газопроводу при температуре 4 °С и давлении 40 кПа. Природный газ по отдельному газопроводу при давлении 60 кПа поступает к запально-защитным устройствам.

На рис. 2 изображена функциональная схема котла с основным оборудованием и технологическими потоками жидкостей и газов.

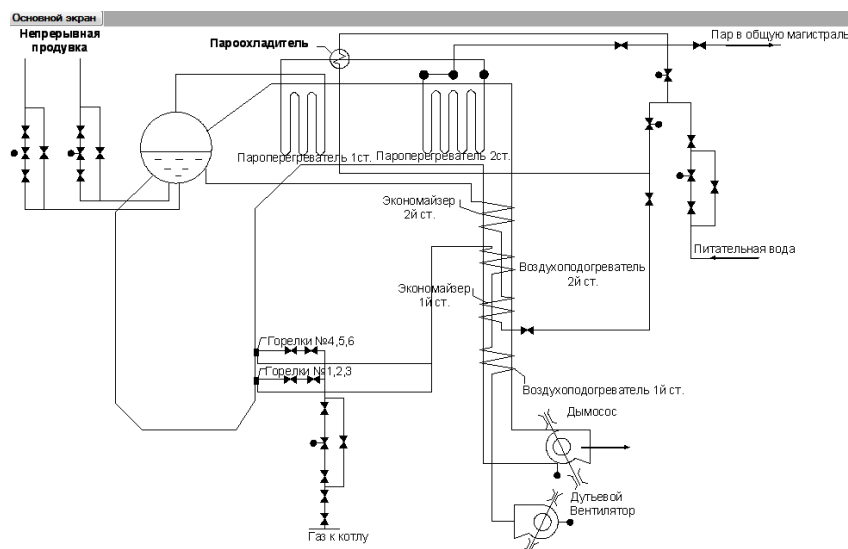


Рис. 2. Функциональная схема

Разработка математической модели технологических процессов. Режим течения пароводяной смеси в экранных трубках парогенератора зависит от теплофизических свойств жидкости и пара, расходов отдельных фаз, а также от размеров и положения трубки в пространстве [4, 6, 7]. В вертикальных трубках существуют 4 основных режима течения: пузырьковый, снарядный, кольцевой и эмульсионный. Вследствие постепенного испарения воды в экранных трубах прямооточного парогенератора возможны все режимы двухфазного течения [13, 17].

Теплообмен в экранных трубках. Значительная часть экранных труб парогенератора находится в пределах топки котла, где температура факела достигает 2000 °С. Согласно закону Стефана-Больцмана, описывающему теплообмен путем излучения, тепловой поток между факелом с температурой Θ_{ϕ} и стенкой топки с температурой $\Theta_{ст}$ определяется зависимостью

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\phi} \varepsilon_{ст} C_0 F \left[\left(\frac{\Theta_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_{ст}}{100} \right)^4 \right],$$

где ε_{ϕ} , $\varepsilon_{ст}$ – приведенные коэффициенты излучения факела и стенки топки соответственно; $C_0 = 5.76 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела. Поскольку температура факела значительно выше температуры поверхности нагрева, можно принять, что тепловой поток не зависит от температуры трубок.

Рассмотрим уравнения движения, описывающие течение одно- и двухфазной рабочей среды в экранных трубках парогенератора [18, 19, 21].

Дифференциальные уравнения однофазного потока. Условия баланса массы, энергии и количества движения для однофазного течения в трубках парогенератора в результате преобразований можно приближенно записать в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial z} &= - \frac{\partial \rho}{\partial t}; \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= q'_d; \\ \frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{M^2}{\rho} &= 0, \end{aligned}$$

где $M(z, t) = \rho w$ – массовый расход (w – скорость движения жидкости);

$\rho(z, t) = \rho(p, h)$ – плотность жидкости;

$h(z, t)$ – энтальпия жидкости;

$p(z, t)$ – давление;

$q'_d = \pi d \alpha (\Theta_{in} - \mathcal{G})$ – внутренний тепловой поток на единицу длины трубки (d – внутренний диаметр трубки; $\alpha(p, h, M, q)$ – коэффициент теплообмена; q – тепловой поток на единицу длины трубки; Θ_{in} – температура внутренней поверхности стенки трубки; Θ – температура рабочей среды; $\mathcal{G}(p, h)$ – температура жидкости);

g – ускорение свободного падения;

β – угол между трубкой парогенератора и вертикалью;

f – коэффициент потери давления.

Система уравнений в частных производных гиперболического типа имеет характеристические значения W , $W + C_s$, $W - C_s$, определяющие скорости перемещений вдоль длины трубки, где C_s – скорость звука [18].

Аналогично были разработаны дифференциальные уравнения для многофазного потока парожидкостной смеси.

Парожидкостный поток, перемещающийся в экранной трубке парогенератора, можно считать одномерным. В таком случае система дифференциальных уравнений, описывающих течение пароводяной смеси в экранных трубках парогенератора, принимает следующий вид:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t};$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = q'_d - \frac{\partial}{\partial z} \left[M \left(\frac{w_2}{w} - 1 \right) (h - h') \right];$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{M^2}{\rho} = 0;$$

$$\frac{w_2}{w} = 1 / [c + (1 - c) / S]; \quad S = f(M, p, h),$$

где $\rho(z, t) = \rho(p, h)$ – плотность пароводяной смеси;

$h(z, t)$ – энтальпия пароводяной смеси;

w_2 – скорость движения пара;

w – скорость пароводяной смеси;

h' – энтальпия кипящей воды;

$c = (h - h') / h_{21}$ – массовая доля пара ($h_{21} = h'' - h'$ – тепло испарения;

h'' – энтальпия сухого насыщенного пара);

$(1 - c)$ – массовая доля воды;

$S = w_2 / w_1 = (1 - c)x / (1 - x)c$ – коэффициент скольжения;

$w_1 = (1 - x)w / (1 - c)$ – скорость движения воды;

$x = c w_2 / w$ – массовое расходное паросодержание.

Дифференциальные уравнения теплообмена в стенках трубок. Если параметры материала трубки λ , $\rho_{тр}$, $c_{тр}$ не зависят от температуры, уравнение теплопроводности принимает форму:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \nabla^2 \Theta,$$

где $a = \lambda / (\rho_{тр} c_{тр})$ – коэффициент выравнивания температур; λ – коэффициент теплопроводности; $\rho_{тр}$, $c_{тр}$ – плотность и удельная теплоемкость стенки трубки [14, 20].

В цилиндрической системе координат лапласиан $\nabla^2 \Theta$ имеет вид

$$\nabla^2 \Theta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \text{ при граничных условиях:}$$

$$\pi D \lambda \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} \right)_{r=\frac{D}{2}} = q, \quad \pi d \lambda \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} \right)_{r=\frac{d}{2}} = \pi d \alpha [\Theta_{in} - \mathcal{G}] = q_{in};$$

где r – радиальная координата;

φ – угол по периметру трубки;

D, d – внешний и внутренний диаметры трубки парогенератора;

Θ_{in} – температура внутренней поверхности стенки трубки.

В условиях эксплуатации парогенератора градиентом температуры вдоль оси можно пренебречь по сравнению с градиентом вдоль радиуса и периметра трубки [22, 23].

Математическая модель сепаратора. Роль сепаратора в прямоточных парогенераторах заключается в отделении воды из пароводяной смеси, вытекающей из экранных труб парогенератора. Сепаратор является цилиндрическим баком. В верхней части сепаратора находятся штуцеры для тангенциального ввода пароводяной смеси со скоростью приблизительно 16 м/с. Отсепарированная вода вытекает из сепаратора через тангенциальные штуцеры, расположенные в нижней части, со скоростью приблизительно 2.5 м/с. Механизм разделения парожидкостных смесей представляет собой весьма сложный процесс, зависящий от ряда физических, конструктивных и эксплуатационных факторов [2, 4].

Как объект управления, сепаратор представляет собой систему с четырьмя входными M_p^* , M_{sep}^* , h_{sep}^* , M_{kond}^* и двумя выходными величинами P_{sep} , H_{sep} . В работе принята модель сепаратора с сосредоточенными параметрами, полученная на основе балансов массы и внутренней энергии рабочего вещества, а также баланса тепловой энергии в толстостенной оболочке. Уравнение баланса массы в сепараторе имеет следующий вид:

$$M_{sep}^* - M_{psep}^* - M_{kond}^* = \frac{d}{dt} [V' \rho' + V'' \rho''],$$

где

$V'' = V - V'$ – объем пара в сепараторе;

$V' = AH_{sep}$ – объем воды в сепараторе.

На этой основе получается следующее уравнение баланса массы в сепараторе

$$M_{sep}^* - M_{psep}^* - M_{kond}^* = A(\rho' - \rho'') \frac{dH_{sep}}{dt} + \left[AH_{sep} \frac{d\rho'}{dP} + (V - AH_{sep}) \frac{d\rho''}{dP} \right] \frac{dP_{sep}}{dt}.$$

Уравнение баланса внутренней энергии рабочего вещества в сепараторе можно записать следующим образом

$$M_{sep}^* h_{sep}^* - M_p^* h^{\circ\circ} - M_{kond}^* h^{\circ} - L_{sep} q_d = \left[AH_{sep} \frac{d(\rho^{\circ} h^{\circ})}{dP} + (V - AH_{sep}) \frac{d(\rho^{\circ\circ} h^{\circ\circ})}{dP} \right] \frac{dP_{sep}}{dt} + A[\rho^{\circ} h^{\circ} - \rho^{\circ\circ} h^{\circ\circ}] \frac{dH_{sep}}{dt},$$

где $q_d = \pi d \alpha (\mathcal{G} - \Theta_w)$ – тепловой поток (отнесен к $1m$ длины сепаратора) обмена между рабочим веществом и оболочкой сепаратора;

α – коэффициент теплопередачи между рабочим веществом и оболочкой сепаратора;

Θ_w – температура внутренней поверхности оболочки сепаратора.

В парогенераторе, кроме экранных труб и сепаратора, находятся устройства со значительно менее сложными динамическими свойствами, а именно: смеситель, соединительные трубопроводы, фильтр, а также циркуляционный насос, для которых также были составлены уравнения, описывающие протекающие в них процессы [8].

Данная математическая модель получилась достаточно сложной, и решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным [9–11, 16].

Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы [1] и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным [8, 10].

Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение [12]. С его помощью были рассчитаны значения температур в контрольных точках. Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями датчиков, которые установлены на реальном объекте.

Вывод. В результате работы была составлена математическая модель технологических процессов, протекающих в котле, учитывающая взаимное влияние различных факторов. В процессе разработки программного обеспечения и проверки адекватности модели были реализованы алгоритмы работы котла, учитывающие допустимые пределы изменения параметров во время функционирования оборудования.

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели. Данная модель может использоваться для разработки программных и тренажерных комплексов, позволяющих моделировать различные режимы работы котельных установок типа БКЗ, в том числе аварийные и нештатные ситуации, что, несомненно, позволит повысить уровень подготовки персонала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров Н.Л. Лекции по теории устойчивости гидродинамических и тепловых процессов: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: МФТИ, 2000. – 97 с.
2. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы: учеб. пособие. – Красноярск: ФАО РФ ГОУВПО КГТУ, 2005. – 292 с.
3. Бреус В.И., Беляков И.И. Анализ температурного режима топочных экранов котлов ТГМЕ-464 // Электрические станции. – 1986. – № 8.
4. Геджадзе И.Ю., Шутяев В.П. Об одном методе решения задачи наблюдения для нестационарного температурного поля // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2000. – № 1. – С. 25-34.
5. Галдин В.Д. Паровые и водогрейные котлы: учеб. пособие. – Омск: СибАДИ, 2011. – 47 с.
6. Имаев Д.Х., Станиславски В. Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. – 220 с.
7. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1977.
8. Лесничук А.Н., Лошкарев В.А., Плетнев Г.П. и др. Использование сигнала по тепловосприятности топочных экранов для оценки теплонапряженности поверхностей нагрева барабанного котла // Вестник МЭИ. – 1999. – № 3.
9. Ляшенко А.Л., Золотов О.И. Математическое моделирование распределённого объекта управления с подвижным источником воздействия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2011. – № 1 (115). – С. 113-117.
10. Ляшенко А.Л. Синтез распределенной системы управления тепловыми полями в парогенераторных установках // Сб. трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 131-138.

11. *Ляшенко А.Л., Ильюшин Ю.В., Кучеренко И.А., Новожилов И.М.* Решение задачи моделирования поведения температурного поля в распределенных объектах управления // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – № 7. – С. 48-51.
12. *Ляшенко А.Л.* Разработка программного обеспечения для моделирования тепловых полей в объектах с распределенными параметрами // Труды XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. II часть». – СПб.: СЗТУ, 2011. – С. 55-63.
13. *Магидей П.Л., Воротников Е.Г.* Изменение условий локального и суммарного теплообмена в топке при рециркуляции газов под факел // Энергомашиностроение. – 1972. – № 3.
14. *Першин И.М.* Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск, 2002. – 212 с.
15. Рабочая документация “Автоматизированная система управления котлом БКЗ-75-39 ГМА ТЭЦ-3 котел № 3 АО «Светогорск». Руководство оператора. – СПб., 2014.
16. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
17. *Соколов В.В., Литвинова Л.А.* Тепловые нагрузки в топке котла энергоблока 800 МВт при сжигании природного газа // Теплоэнергетика. – 1998. – № 5.
18. *Станиславски В., Имаев Д.Х.* Динамические модели прямоточных парогенераторов как объектов управления иерархической структуры // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. “Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России” (27-28 июня 2002). – СПб.: СПбГТУ, 2002. – С. 203-203.
19. Таблица физических величин / под ред. акад. Кикоина И.К.. – М.: Автоиздат. – 752 с.
20. Тепловые и атомные электрические станции / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: МЭИ, 2003.
21. *Холщев В.В.* Тепловые нагрузки и температурный режим экранных труб барабанного котла газоплотного исполнения, работающего на мазуте // Теплоэнергетика. – 1986. – № 10.
22. *Щеткин В.С.* Исследование работоспособности труб фронтного экрана котла БКЗ-420-140 НГМ Бобруйской ТЭЦ-2 // Теплоэнергетика. – 1985. – № 1.
23. *Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.* Тепломассообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.

REFERENCES

1. *Aleksandrov N.L.* Leksii po teorii ustoychivosti gidrodinamicheskikh i teplovykh protsessov: ucheb. posobie dlya studentov vuzov [Lectures on the theory of sustainability of hydrodynamic and thermal processes: A manual for university students]. Moscow: MFTI, 2000, 97 p.
2. *Boyko E.A.* Kotel'nye ustanovki i parogeneratory: ucheb. posobie [Boiler installations and steam generators: textbook]. Krasnoyarsk: FAO RF GOUVPO KGTU, 2005, 292 p.
3. *Breus V.I., Belyakov I.I.* Analiz temperaturnogo rezhima topochnykh ekranov kotlov TGME-464 [Analysis of the temperature regime of the flue screens of boilers TGME-464], *Elektricheskie stantsii* [Electric stations], 1986, No. 8.
4. *Gedzhadze I.Yu., Shutyaev V.P.* Ob odnom metode resheniya zadachi nablyudeniya dlya nestatsionarnogo temperaturnogo polya [On a method for solving the observation problem for a nonstationary temperature field], *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 2000, No. 1, pp. 25-34.
5. *Galdin V.D.* Parovye i vodogreynye kotly: ucheb. posobie [Steam and hot water boilers: a tutorial]. Omsk: SibADI, 2011, 47 p.
6. *Imaev D.Kh., Stanislavski V.* Issledovanie dinamiki ierarkhicheskikh sistem na primere parogeneratorov [Study of the dynamics of hierarchical systems on the example of steam generators]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2011, 220 p.
7. *Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G.* Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii [Hydrodynamics and heat exchange during vaporization]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977.
8. *Lesnichuk A.N., Loshkarev V.A., Pletnev G.P. i dr.* Ispol'zovanie signala po teplovospriyatuyu topochnykh ekranov dlya otsenki teplonapryazhennosti poverkhnostey nagreva barabannogo kotla [The use of the signal on the heat of the flue screens to assess the thermal density of the heating surfaces of the drum boiler], *Vestnik MEI* [MPEI Vestnik], 1999, No. 3.

9. Lyashenko A.L., Zolotov O.I. Matematicheskoe modelirovanie raspredelenogo ob"ekta upravleniya s podvizhnym istochnikom vozdeystviya [Mathematical modeling of a distributed control object with a mobile source of influence], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPBGPU. Seriya «Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie»* [Scientific and technical statements SPBGPU. Series "Informatics. Telecommunications. Management"], 2011, No. 1 (115), pp. 113-117.
10. Lyashenko A.L. Sintez raspredelennoy sistemy upravleniya teplovymi polyami v parogeneratorykh ustanovkakh [Synthesis of a distributed control system for thermal fields in steam generating sets], *Sb. trudov 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika» (SSPS-2015)* [Proceedings of the 7th All-Russian Scientific Conference "System Synthesis and Applied Synergetics" (JCSS-2015)]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 131-138.
11. Lyashenko A.L., Ilyushin YU.V., Kucherenko I.A., Novozhilov I.M. Reshenie zadachi modelirovaniya povedeniya temperaturnogo polya v raspredelennykh ob"ektakh upravleniya [Solving the problem of modeling the temperature field behavior in distributed control objects], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [News SPbGETU "LETI"], 2014, No. 7, pp. 48-51.
12. Lyashenko A.L. Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya modelirovaniya teplovykh poley v ob"ektakh s raspredelennymi parametrami [Development of software for modeling thermal fields in objects with distributed parameters], *Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i aspirantov «Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya* [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students and Postgraduates "Analysis and Control Systems Forecasting. Part II]. Saint Petersburg: SZTU, 2011, pp. 55-63.
13. Magidey P.L., Vorotnikov E.G. Izmenenie usloviy lokal'nogo i summarnogo teploobmena v topke pri retsirkulyatsii gazov pod fakel [Changing the conditions of local and total heat exchange in the furnace when gas is recycled under the torch], *Energomashinostroenie* [Power Machinery], 1972, No. 3.
14. Pershin I.M. Sintez sistem s raspredelennymi parametrami [Synthesis of systems with distributed parameters]. Pyatigorsk, 2002, 212 p.
15. Rabochaya dokumentatsiya "Avtomatizirovannaya sistema upravleniya kotlom BKZ-75-39 GMA TETS-3 kotel № 3 AO «Svetogorsk»". Rukovodstvo operatora [Working documentation "Automated control system for boiler BKZ-75-39 GMA CHPP-3, boiler No. 3 of Svetogorsk JSC". Operator's manual]. Saint Petersburg, 2014.
16. Rapoport E.Ya. Strukturnoe modelirovanie ob"ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 299 p.
17. Sokolov V.V., Litvinova L.A. Teplovye nagruzki v topke kotla energobloka 800 MVt pri szhiganii prirodnogo gaza [Thermal loads in the furnace of the boiler of a 800 MW power unit when burning natural gas], *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1998, No. 5.
18. Stanislavski V., Imaev D.Kh. Dinamicheskie modeli pryamotochnykh parogeneratorov kak ob"ektov upravleniya ierarkhicheskoy struktury [Dynamic models of direct-flow steam generators as control objects of a hierarchical structure], *Tr. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitiya elektroenergetiki Rossii" (27-28 iyunya 2002)* [Pr. International scientific practical conf. "Theoretical and practical problems of the development of the electric power industry in Russia" (June 27-28, 2002)]. Saint Petersburg: SPbGTU, 2002, pp. 203-203.
19. Tablitsa fizicheskikh velichin [Table of physical quantities], ed. by akad. Kikoina I.K. Moscow: Avtomizdat, 752 p.
20. Teplovye i atomnye elektricheskie stantsii [Thermal and nuclear power plants], under total. ed. V.A. Grigor'eva, V.M. Zorina. 3 ed. Moscow: MEI, 2003.
21. Kholshchev V.V. Teplovye nagruzki i temperaturnyy rezhim ekrannykh trub barabannogo kotla gazoplotnogo ispolneniya, rabotayushchego na mazute [Heat loads and temperature conditions of screen tubes of a gas-tight drum-type boiler operating on fuel oil], *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1986, No. 10.

22. *Shchetkin V.S.* Issledovanie rabotosposobnosti trub frontovogo ekrana kotla BKZ-420-140 NGM Bobruyskoy TETS-2 [Investigation of the performance of pipes of the frontal screen of the boiler BKZ-420-140 NGM Bobruiskaya CHPP-2] *Teplotenergetika* [Thermal Engineering], 1985, No. 1.
23. *Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A.* *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow: Izd-vo MEI, 2005, 550 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор, А.Р. Бестугин.

Ляшенко Александр Леонидович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург; e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru; 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А; тел.: +79111049232; кафедра управления в технических системах; доцент.

Liashenko Alexander Leonidovich – Saint-Petersburg State university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg; e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru; 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia; phone: +79111049232; the department of control in technical systems; associate professor.

УДК 531.38, 575

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-110-119

Д.В. Тимошенко, Г.В. Куповых, А.А. Илюхин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Излагаются основы метода анализа геометрических конфигураций упругих одномерных объектов (гибких стержней), изготовленных из композитных материалов, обладающих многослойной внутренней структурой. Интерес к изучению процессов деформации стержней связан с тем, что стержни или объекты, близкие к ним по свойствам, являются конструктивными элементами большого количества технических систем. В качестве примеров здесь можно привести подвижные, соединительные и демпфирующие устройства и конструкции в транспорте и инженерных сооружениях. Кроме того, модель гибкого стержня находит свое применение в исследовании поведения и свойств молекул биологических полимеров и, в частности, ДНК. Необходимость разработки новых и развития существующих методов качественного и численного анализа динамики упругих элементов технических систем объясняется высокими требованиями к таким исследованиям, их прикладным характером. В то же время, отсутствие строгой непрерывности с одновременным усложнением иерархичности структур для композитных материалов в случае значительных деформаций ведет к принципиальным трудностям описания этих явлений с помощью стандартных методов теории упругости. Создание в последнее время технологий микроструктурных исследований позволяет делать выводы о существенном влиянии структурных свойств вещества на динамику процессов деформации. Расширение области применения композитных материалов вызывает необходимость интенсификации исследований зависимостей между механическими свойствами композитов и их структурой, в том числе с точки зрения определения устойчивых форм равновесия деформированных упругих элементов. Описанный в работе метод перехода от структурных характеристик материала к пространственной геометрии объекта проиллюстрирован на примере состояния естественной закрученности стержня. Особое внимание уделено изучению условий образования замкнутых конфигураций, поскольку они соответствуют критическим случаям функционирования систем.

Упругие стержни; модели сплошной среды; композитные материалы.