*УДК 66.096.5*

**А.П. НЕСЕНЧУК, В.Н. РОМАНЮК, В.А. СЕДНИН, Е.Н. АНТОНИШИНА, Д.И. ШКЛОВЧИК, АТИЛЛА ТОРДАН, А.П. ВАЛУЕВ, А.А. ШКЛЯР**

# АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ТЕРМОПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Любое из дифференциальных уравнений, приведенных в [1] ,

$$\rho_{\text{г}} \frac{1}{g_{11}} \frac{\partial (w_{\text{г}u}\epsilon)}{dU} = \frac{1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{g_{11}g_{22}}{g_{22}g_{22}} \rho_{\text{г}} D_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial V} + I(a - a(T))\rho_{\text{т}}(1-\epsilon); \tag{1}$$

$$\frac{G_u}{g_{11}} \frac{\partial a}{\partial U} = \frac{1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{g_{11}}{g_{22}} \frac{g_{22}}{g_{22}} \rho_{\text{т}}(1-\epsilon) D_a \frac{\partial a}{\partial V} - I(a - a(T))\rho_{\text{т}}(1-\epsilon); \tag{2}$$

$$\frac{(c_{\text{т}} + c_{\text{г}}a)\, G_u}{g_{11}} \frac{\partial T}{\partial U} = \frac{1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{g_{11}g_{22}}{g_{22}g_{22}} \rho_{\text{т}}(1 - \epsilon)(c_{\text{т}} + c_{\text{г}}a) D_{\text{т}} \frac{\partial T}{\partial V} - HI(a - a(T))\rho_{\text{т}}(1-\epsilon) \tag{3}$$

может быть представлено в форме

$$A \frac{\partial Z}{\partial U} = \frac{\partial}{\partial V} B \frac{\partial Z}{\partial V} + D(Z - Z_0) . \tag{4}$$

Для решения уравнения (4) применялся конечно-разностный аналог с неявной схемой на неравномерной криволинейной сетке по $V$ и $U$ . По координате $U$ область разбивалась на 61 точку – $U_i$ , $i = 1, 2, ..., 61$, по координате $V$ – на 20 точек $V_j$ , $j = 1, 2, ..., 20$. Конечно-разностный аналог уравнения (4) запишется так:

$$\frac{A_{ij}z_{ij} - A_{i-1,j}z_{i-1,j}}{u_i - u_{i-1}} = D_{ij}(z_{i,j} - z_{0i,j}) + \left( \frac{B_{i,j+1} + B_{i,j}}{2} \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{V_{j+1} - V_j} - \frac{B_{i,j} + B_{i,j-1}}{2} \frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{V_j - V_{j-1}} \right) \times \left( \frac{V_{j+1} - V_{j-1}}{2} \right)^{-1} \tag{5}$$

для $2 \leqslant i \leqslant 61,\ 2 \leqslant j \leqslant 20$.

Разностный аналог (5) приводит к системе уравнений с трехдиагональной матрицей для каждого $i$. Для определения неявно заданных значений необходимо решить систему линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} b_1^i & c_1^i & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2^i & b_2^i & c_2^i & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3^i & b_3^i & c_3^i & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ . & . & . & & \ddots & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{J-2}^i & b_{J-2}^i & c_{J-2}^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{J-1}^i & b_{J-1}^i & c_{J-1}^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & a_J^i & b_J^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ z_{i3} \\ z_{ij} \\ . \\ . \\ z_{IJ} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1^i \\ d_2^i \\ d_3^i \\ d_j^i \\ . \\ . \\ d_J^i \end{pmatrix} = 0$$

для $i = 1, 2, \dots, I$ и $j = 1, 2, \dots, J$, где $a_1^i = c_J^i = 0$; $b_1^i, c_1^i, d_1^i$ и $a_J^i, b_J^i, d_J^i$ определяются конкретными граничными условиями:

$$a_j^i = \frac{B_{i,j+1} + B_{i,j}}{(\Delta V_{j+1} + \Delta V_j)\Delta V_{j+1}}; \quad c_j^i = \frac{B_{i,j+1} + B_{i,j}}{(\Delta V_{j+1} + \Delta V_j)\Delta V_j};$$

$$d_j^i = \frac{A_{i-1,j}\, z_{i-1,j}}{\Delta U_i} - D_{i,j} Z_{i,j};$$

$$b_j^i = D_{ij} - a_j^i - c_j^i - \frac{A_{i,j}}{\Delta U_i}; \quad \Delta U_i = U_i - U_{i-1};$$

$$\Delta V_{j+1} = V_{j+1} - V_j; \quad \Delta V_j = V_j - V_{j-1}.$$

При этом $Z$ нахожится из начального условия для уравнения (4).

Система уравнений (5) для каждого случая решается при помощи стандартной процедуры решения трехдиагональной системы уравнений, оформленной в виде подпрограммы SYSTRD в библиотеке программ ЕС ЭВМ.

Решение уравнения (4) получается прогонкой по всем $i = 2, 3, \dots, 61$. Указанная процедура является основой алгоритма.

Сложность решения системы (1) – (3) заключается в том, что все коэффициенты в этих уравнениях нелинейны относительно искомых функций $\varepsilon$, $a$ и $T$. Для того чтобы решить систему (1) – (3) с учетом нелинейности коэффициентов, пришлось воспользоваться методом итераций от начального приближения $a_{i,j} = a_0$, $T_{i,j} = T_0$ и $\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_0$. Итерация проводилась как на каждом слое, так и на всей системе с пересчетом всех коэффициентов по новым значениям $T_{i,j}$, $\varepsilon_{i,j}$, $a_{i,j}$. На каждой итерации, которую можно нумеровать индексом "$k$", новое значение функций находилось линейной комбинацией старого значения и нового, найденного по трехдиагональной процедуре (индекс "нов"):

$$T_{i,j}^{k} = \frac{T_{i,j}^{\text{нов}} + T_{i,j}^{k-1}}{2};$$

$$a_{i,j}^{k} = a_{i,j}^{k-1};$$

$$\varepsilon_{i,j}^{k} = \rho_{\text{г}} w_{\text{г}\, i,j}\, \varepsilon_{i.j}^{\text{нов}} + (1 - \rho_{\text{г}} w_{\text{г}\, i,j})\, \varepsilon_{i,j}^{k-1}.$$

Лишь такая итерационная схема позволяет добиться устойчивого решения системы нелинейных уравнений.

После решения системы уравнений определялись интегральные характеристики на каждом слое $i = 2, 3, ..., 61$ и по высоте:

среднемассовая температура слоя

$$\overline{T}_i = \frac{1}{V_0} \sum_{j=2}^{20} \frac{(T_{i,j-1} + T_{i,j})(V_j - V_{j-1})}{2};$$

среднемассовая степень адсорбции

$$\overline{a}_i = \frac{1}{V_0} \sum_{j=2}^{20} \frac{(a_{i,j} + a_{i,j-1})(V_j - V_{j-1})}{2};$$

средняя порозность слоя

$$\overline{\varepsilon}_i = \frac{1}{V_0} \sum_{j=2}^{20} \frac{(\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i,j-1})(V_j - V_{j-1})}{2};$$

энтальпия слоя

$$\overline{H}_i = (c_{\text{т}} + a c_{\text{г}})\, G \overline{T};$$

прирост энтальпии слоя

$$\Delta H = \overline{H}_i - \overline{H}_{i-1};$$

отклонение средней степени адсорбции в слое от идеальной, т. е. той, которая имела бы место при равномерном прогреве слоя до его средней температуры

$$\Delta a_i = \overline{a}_i - a(\overline{T}_i).$$

Характеристикой качества нагрева может служить $\Delta a_i$.

Описанный алгоритм реализован в виде программы для ЕС ЭВМ. Время счета одного варианта составляет около 20 мин на ЭВМ ЕС-1035.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н е с е н ч у к А.П. Исследование свойств адсорбционной системы с термопсевдоожиженным слоем сорбента // Науч. и прикл. пробл. энергетики. – Мн.: Выш. шк., 1986. – Вып. 13. – С. 6–12.

*УДК 621.181.62*

**В.К. СУДИЛОВСКИЙ,**
**А.В. ЩЕРБИЧ**

# ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА РАДИАЦИОННОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ С ДВУХФАЗНОЙ СРЕДОЙ

В европейской части СССР возрастает необходимость привлекать к регулированию графиков электрических нагрузок мощные энергоблоки ТЭС. Поэтому проблема автоматизации переменных режимов ТЭС приобретает особое значение. В этой связи задача автоматического управления встроенными сепараторами (ВС), которые являются основным элементом пусковой схемы прямоточных котлов, оказывается одной из наиболее важных и актуальных. Как показано в работе [1], перспективными являются АСР ВС, которые используют сигнал по паросодержанию, полученный на основе диэлькометрического метода измерения степени сухости влажного водяного пара.

Для выбора оптимальной структуры АСР ВС с сигналом по паросодержанию отсепарированного пара была разработана предлагаемая линейная математическая модель, описывающая изменение средней температуры металла $\theta$ радиационного пароперегревателя (ПП) с двухфазной средой при отклонении степени сухости $x$ на его входе. В рассматриваемой модели параметры ПП изменяются лишь вдоль одной пространственной координаты $z$, причем координатная ось сонаправлена с вектором скорости пароводяного потока. По сечению канала параметры постоянны и равны среднему значению. Исходная система уравнений включает уравнения сплошности, энергии, теплового баланса, состояния вещества, записанные в частных производных:

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{f}{v^2}\frac{\partial v}{\partial \tau}\ ; \tag{1}$$

$$G\frac{\partial i}{\partial z} + \frac{f}{v}\frac{\partial i}{\partial \tau} = \alpha h\,(\theta - t)\,; \tag{2}$$

$$g - g_{м} C_{м}\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha h\,(\theta - t)\,; \tag{3}$$

$$v = f(p, x)\ ; \tag{4}$$

$$t = f(p)\ , \tag{5}$$

где $G$, $v$, $i$, $t$, $p$ – соответственно расход, удельный объем, энтальпия, температура, давление двухфазной среды в ПП; $f$, $h$ – соответственно площадь попе-