УДК 621.036.7

МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ

А. И. Степанова, кандидат технических наук

Институт технической теплофизики НАН Украины

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. *Предлагается макроскопическая модель трехфазной термодинамической системы с переменной концентрацией одной из фаз и приводится вывод локального дифференциального уравнения эксергетического баланса, которое может быть использовано для решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах.*

Ключевые слова: ***эффективность, оптимизация, теплоутилизационная система***

h – удельная энтальпия;

I_i – внешние потоки;

e – удельная эксергия;

P_{ij} – тензор напряжений;

p – давление;

q_{ij} – межфазная теплота;

R_{ij} – сила межфазного взаимодействия;

s – удельная энтропия;

T – температура;

t – время;

u – удельная внутренняя энергия;

V – объем;

v – скорость;

w –концентрация;

ρ – плотность;

σ – источники эксергии, энтропии;

τ_{ij} – тензор вязких напряжений;

τ_e – эксергетическая температура;

φ – удельная потенциальная энергия.

Индексы верхние:

(e) – эксергия;

(s) – энтропия;

(q) – теплота;

(1), (2), (3) – первая, вторая, третья фазы;

цм – центр масс.

Индексы нижние:

0 – окружающая среда;

1, 2, 3 – первая, вторая, третья фазы.

Необходимой составляющей общего процесса совершенствования энерготехнологических систем в коммунальной и промышленной теплоэнергетике является их термодинамическая оптимизация. В число основных ее задач входят выбор критериев оценки эффективности системы, которые могут служить целевыми функциями оптимизации, выбор методов исследования и выбор методов оптимизации, которые включают получение необходимых уравнений, использующихся для решения оптимизационных задач.

Современные системы утилизации теплоты отходящих газов таких энергетических установок, как котельные агрегаты, стекольные и плавильные печи и др. используют в качестве теплоносителей, как правило, многофазные среды с переменной концентрацией одной или нескольких фаз. Такими теплоносителями в теплоутилизационных системах являются, например, запыленные дымовые газы и воздух, содержащие пары воды. При этом степень запыленности и влагосодержание парогазовых смесей в процессе прохождения через теплоутилизационную систему может изменяться в различных пределах в зависимости от назначения и конструкции такой системы. Так, при глубокой утилизации теплоты отходящих дымовых газов отопительных котелен абсолютная влажность дымовых газов в теплоутилизаторах при невысоких нагрузках котла может изменяться в 2,5…4 раза, а в теплоутилизационных системах, предназначенных для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха котельных установок, абсолютная влажность воздуха может изменяться в десятки раз. На стекловырабатывающих предприятиях в печных отходящих газах присутствует значительное количество загрязняющих компонентов. Эти компоненты, содержание которых в промышленных печах изменяется от 50 до 1000 мг/м3, включают твердый технологический унос (песок, соли натрия, алюминий, сажу и др.), а также коррозионноактивные соединения азота, серы, углерода, фтора и других вредных и химически агрессивных веществ в газообразной фазе. Степень запыленности отходящих газов в процессе прохождения через теплоутилизационную систему изменяется вследствие образования слоя шлаковых отложений на теплообменных поверхностях теплоутилизаторов, что существенно снижает их эффективность [1,2].

В таких многофазных средах существуют одновременно различные термодинамические силы и необратимые потоки, что позволяет искать функциональные зависимости, необходимые для решения оптимизационных задач, используя методы термодинамики необратимых процессов совместно с эксергетическими методами [3–5].

Цель исследований – разработка макроскопической модели поведения трехфазной термодинамической системы переменной массы при изменении концентрации одной из фаз и получение локального дифференциального уравнения эксергетического баланса, которое может быть использовано для решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах.

Материалы и методика исследований. Для разработки макроскопической модели поведения трехфазной термодинамической системы переменной массы при изменении концентрации одной из фаз и получения локального дифференциального уравнения эксергетического баланса используется математический аппарат, который включает методы термодинамики необратимых процессов совместно с методами эксергетического анализа. Термодинамическая система рассматривается как микронеоднородная среда, включающая три фазы: первая фаза – газ, массой m_1, объемом V_1, плотностью ρ_1, с концентрацией $w_1 = m_{1/}\ m$, вторая фаза – твердые частицы, массой m_2, объемом V_2, плотностью ρ_2, с концентрацией $w_2 = m_{2/}\ m$ и третья фаза – пары воды, массой m_3, объемом V_3, плотностью ρ_3,,с концентрацией $w_3 = m_{3/}\ m$. Концентрация одной из фаз является переменной величиной. Для теплоутилизационных систем это может быть либо концентрация твердых пылевых частиц в дымовых газах, либо концентрация паров жидкости в дымовых газах или в воздухе.

Результаты исследований. Выражение для удельной эксергии и дифференциальные балансовые уравнения эксергии и энтропии для такой термодинамической системы можно записать в следующем виде:

$$e = \;h - h_0\; - T_0\; s - s_0\; + v^2/2 + \varphi, \tag{1}$$

$$\rho \frac{de}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} I_i^{(e)} + \sigma^{(e)}, \tag{2}$$

$$\rho \frac{ds}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} I_i^{(s)} + \sigma^{(s)}. \tag{3}$$

Из (1) – (3) следуют уравнение Гюи-Стодолы и уравнение для потока эксергии теплоты:

$$\sigma^{(e)} = -T_0 \sigma^{(s)}, \tag{4}$$

$$I_i^{(e_q)} = \tau_e I_i^{(q)}, \tag{5}$$

где $\tau_e = 1 - T_0/T$ – эксергетическая температура.

Для трехфазной термодинамической системы уравнение изменения массы при изменении концентрации одной из фаз, в данном случае концентрации третьей фазы, получено следующим образом:

$$\rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3,$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{V}\frac{dV}{dt} - \frac{\rho_3}{V}\frac{dV_3}{dt} = 0,$$

$$\rho_3 V_3 = w_3 \rho V,$$

$$\rho_3 \frac{dV_3}{dt} = \rho V \frac{dw_3}{dt} + w_3 V \frac{d\rho}{dt} + w_3 \rho \frac{dV}{dt},$$

$$\frac{\rho_3}{V}\frac{dV_3}{dt} = \rho \frac{dw_3}{dt} + w_3 \frac{d\rho}{dt} + \frac{w_3 \rho}{V}\frac{dV}{dt},$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{V}\frac{dV}{dt} - \rho \frac{dw_3}{dt} - w_3 \frac{d\rho}{dt} - \frac{w_3 \rho}{V}\frac{dV}{dt} = 0,$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{V}\frac{dV}{dt} = \frac{\rho}{1\text{-}w_3}\frac{dw_3}{dt}. \tag{6}$$

Из механики деформируемых сред:

$$\frac{1}{V}\frac{dV}{dt} = \mathrm{div}\vec{v}, \tag{7}$$

Тогда уравнение изменения массы при изменении концентрации одной из фаз принимает вид:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div\vec{v} = \frac{\rho}{1-w_3}\frac{dw_3}{dt}. \tag{8}$$

Или в эквивалентной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho v_i = \frac{\rho}{1-w_3}\frac{dw_3}{dt}. \tag{9}$$

По двум повторяющимся индексам производится суммирование. В частном случае при постоянной концентрации третьей фазы уравнение (9) переходит в классическое уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho v_i = 0.$$

Тогда в соответствии с (9) для каждой из фаз можно записать:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(1-w_2-w_3) + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho(1-w_2-w_3)v_i^{(1)} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho w_2 + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho w_2 v_i^{(2)} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho w_3 + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho w_3 v_i^{(3)} = \frac{\rho}{1-w_3}\frac{dw_3}{dt}. \tag{10}$$

Введем следующие обозначения для операторов:

$$\frac{d_1}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i^{(1)}\frac{\partial}{\partial x_i};\ \frac{d_2}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i^{(2)}\frac{\partial}{\partial x_i};\ \ \frac{d_3}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i^{(3)}\frac{\partial}{\partial x_i};\ \ \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i^{\text{цм}}\frac{\partial}{\partial x_i};$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{d_1}{dt} - \ \ v_i^{(1)} - v_i^{\text{цм}}\ \ \frac{\partial}{\partial x_i};\ \frac{d}{dt} = \frac{d_2}{dt} - \ \ v_i^{(2)} - v_i^{\text{цм}}\ \ \frac{\partial}{\partial x_i};$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{d_3}{dt} - \ \ v_i^{(3)} - v_i^{\text{цм}}\ \ \frac{\partial}{\partial x_i}. \tag{11}$$

Здесь $v_i^{\text{цм}} = w_1 v_i^{(1)} + w_2 v_i^{(2)} + w_3 v_i^{(3)}$ – скорость центра масс термодинамической системы.

С использованием уравнений (10) и операторов (11) получено промежуточное дифференциальное уравнение эксергии для трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз. Далее приведен вывод указанного уравнения. В силу одной из основных особенностей эксергии – аддитивности, можно записать:

$$\rho e = \rho w_1 e_1 + \rho w_2 e_2 + \rho w_3 e_3. \tag{12}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \rho \frac{de}{dt} + e\frac{d\rho}{dt} &= e_1 \frac{dw_1\rho}{dt} + e_2 \frac{dw_2\rho}{dt} + e_3 \frac{dw_3\rho}{dt} + w_1\rho \frac{d_1 e_1}{dt} + w_2\rho \frac{d_2 e_2}{dt} + \\ &+ w_3\rho \frac{d_3 e_3}{dt} - I_i^{(1)} \frac{\partial e_1}{\partial x_i} - I_i^{(2)} \frac{\partial e_2}{\partial x_i} - I_i^{(3)} \frac{\partial e_3}{\partial x_i}, \end{aligned} \tag{13}$$

где величины:

$$I_i^{(1)} = w_1\rho(v_i^{(1)} - v_i^{\text{цм}}),\ I_i^{(2)} = w_2\rho(v_i^{(2)} - v_i^{\text{цм}}),\ I_i^{(3)} = w_3\rho(v_i^{(3)} - v_i^{\text{цм}}) \tag{14}$$

представляют собой диффузионные потоки фаз.

$$\begin{aligned} \rho \frac{de}{dt} &= w_1\rho \frac{d_1 e_1}{dt} + w_2\rho \frac{d_2 e_2}{dt} + w_3\rho \frac{d_3 e_3}{dt} - I_i^{(1)} \frac{\partial e_1}{\partial x_i} - I_i^{(2)} \frac{\partial e_2}{\partial x_i} - I_i^{(3)} \frac{\partial e_3}{\partial x_i} + \\ &+ e_1 \frac{d_1 w_1\rho}{dt} + e_2 \frac{d_2 w_2\rho}{dt} + e_3 \frac{d_3 w_3\rho}{dt} - e_1 \;\; v_i^{(1)} - v_i^{\text{цм}} \;\; \frac{\partial w_1\rho}{\partial x_i} - \\ &- e_2 \;\; v_i^{(2)} - v_i^{\text{цм}} \;\; \frac{\partial w_2\rho}{\partial x_i} - e_3 \;\; v_i^{(3)} - v_i^{\text{цм}} \;\; \frac{\partial w_3\rho}{\partial x_i} - e\frac{d\rho}{dt}, \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{de}{dt} &= w_1\rho \frac{d_1 e_1}{dt} + w_2\rho \frac{d_2 e_2}{dt} + w_3\rho \frac{d_3 e_3}{dt} - I_i^{(1)} \frac{\partial e_1}{\partial x_i} - I_i^{(2)} \frac{\partial e_2}{\partial x_i} - I_i^{(3)} \frac{\partial e_3}{\partial x_i} + \\ &+ e_1 \frac{d_1 w_1\rho}{dt} + e_2 \frac{d_2 w_2\rho}{dt} + e_3 \frac{d_3 w_3\rho}{dt} - e_1 \frac{\partial I_i^{(1)}}{\partial x_i} - e_2 \frac{\partial I_i^{(2)}}{\partial x_i} - e_3 \frac{\partial I_i^{(3)}}{\partial x_i} + \\ &+ e_1 w_1\rho \frac{\partial v_i^{(1)}}{\partial x_i} + e_2 w_2\rho \frac{\partial v_i^{(2)}}{\partial x_i} + e_3 w_3\rho \frac{\partial v_i^{(3)}}{\partial x_i} - e_1 w_1\rho \frac{\partial v_i^{\text{цм}}}{\partial x_i} - e_2 w_2\rho \frac{\partial v_i^{\text{цм}}}{\partial x_i} - \\ &- e_3 w_3\rho \frac{\partial v_i^{\text{цм}}}{\partial x_i} - e\frac{d\rho}{dt}, \end{aligned} \tag{16}$$

$$\rho\frac{de}{dt}=w_1\rho\frac{d_1e_1}{dt}+w_2\rho\frac{d_2e_2}{dt}+w_3\rho\frac{d_3e_3}{dt}-\frac{\partial}{\partial x_i}\ e_1I_i^{(1)}+e_2I_i^{(2)}+e_3I_i^{(3)}\ +$$

$$+e_1\left(\frac{\partial w_1\rho}{\partial t}+\frac{\partial v_i^{(1)}w_1\rho}{\partial x_i}\right)+e_2\left(\frac{\partial w_2\rho}{\partial t}+\frac{\partial v_i^{(2)}w_2\rho}{\partial x_i}\right)+ \quad (17)$$

$$+e_3\left(\frac{\partial w_3\rho}{\partial t}+\frac{\partial v_i^{(3)}w_3\rho}{\partial x_i}\right)-e\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial v_i\rho}{\partial x_i}\right).$$

Тогда промежуточное дифференциальное уравнение эксергии трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз приобретает следующий вид:

$$\rho\frac{de}{dt}=(1-w_2-w_3)\rho\frac{d_1e_1}{dt}+w_2\rho\frac{d_2e_2}{dt}+w_3\rho\frac{d_3e_3}{dt}-\frac{\partial}{\partial x_i}(e_1I_i^{(1)}+e_2I_i^{(2)}+$$

$$+e_3I_i^{(3)})-\frac{\rho\ \ e-e_3}{1-w_3}\frac{dw_3}{dt} \quad (18)$$

В последующих выкладках для получения окончательной формы локального дифференциального уравнения баланса эксергии трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз используются уравнения движения фаз, баланса кинетической, потенциальной полной и внутренней энергий, уравнения баланса энтальпий и уравнения Гиббса.

Уравнения движения фаз:

$$1-w_1-w_2\ \ \rho\frac{d_1v_1}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}P_{ij}^{(1)}+(1-w_1-w_2)\rho g_i+R_i^{(12)}+R_i^{(13)},$$

$$w_2\rho\frac{d_2v_i}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}P_{ij}^{(2)}+w_2\rho g_i-R_i^{(12)}+R_i^{(23)},$$

$$w_3\rho\frac{d_3v_i}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}P_{ij}^{(3)}+w_3\rho g_i+R_i^{(32)}-R_i^{(13)}. \quad (19)$$

Здесь $P_{ij}^{(1)}=p^{(1)}\delta_{ij}+\tau_{ij}^{(1)}, P_{ij}^{(2)}=p^{(2)}\delta_{ij}+\tau_{ij}^{(2)}$ и $P_{ij}^{(3)}=p^{(3)}\delta_{ij}+\tau_{ij}^{(3)}$ – тензоры напряжений фаз.

Для кинетической энергии уравнения баланса имеют следующий вид:

$$
\begin{aligned}
&(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1}{dt}\frac{1}{2}\left(v^{(1)}\right)^2=-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(P_{ij}^{(1)}v_j^{(1)}\right)+(1-w_1-w_2)\rho g_i v_i^{(1)}+\\
&+R_i^{(12)}v_i^{(1)}+R_i^{(13)}v_i^{(1)}+P_{ij}^{(1)}\frac{\partial v_i^{(1)}}{\partial x_i},\\
&w_2\rho\frac{d_2}{dt}\frac{1}{2}\left(v^{(2)}\right)^2=-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(P_{ij}^{(2)}v_j^{(2)}\right)+w_2\rho g_i v_i^{(2)}-R_i^{(12)}v_i^{(2)}+\\
&+R_i^{(23)}v_i^{(2)}+P_{ij}^{(2)}\frac{\partial v_i^{(2)}}{\partial x_i},\\
&w_3\rho\frac{d_2}{dt}\frac{1}{2}\left(v^{(3)}\right)^2=-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(P_{ij}^{(3)}v_j^{(3)}\right)+w_3\rho g_i v_i^{(3)}+R_i^{(32)}v_i^{(3)}-\\
&-R_i^{(13)}v_i^{(3)}+P_{ij}^{(3)}\frac{\partial v_i^{(3)}}{\partial x_i}.
\end{aligned}
\tag{20}
$$

Для потенциальной энергии:

$$
\begin{aligned}
&(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1\varphi_1}{dt}=-(1-w_1-w_2)\rho g_i v_i^{(1)},\\
&w_2\rho\frac{d_2\varphi_2}{dt}=-w_2\rho g_i v_i^{(2)},\\
&w_3\rho\frac{d_2\varphi_3}{dt}=-w_3\rho g_i v_i^{(3)}.
\end{aligned}
\tag{21}
$$

Для полной энергии фаз:

$$
\begin{aligned}
&(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1}{dt}[u_1+\frac{1}{2}(v^{(1)})^2+\varphi_1]=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(1)}v_j^{(1)}+I_i^{(q_1)})+q_{12}+q_{13},\\
&w_2\rho\frac{d_2}{dt}[u_2+\frac{1}{2}(v^{(2)})^2+\varphi_2]=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(2)}v_j^{(2)}+I_i^{(q_2)})-q_{12}+q_{23},\\
&w_3\rho\frac{d_3}{dt}[u_3+\frac{1}{2}(v^{(2)})^2+\varphi_3]=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(3)}v_j^{(3)}+I_i^{(q_3)})+q_{32}-q_{13},
\end{aligned}
\tag{22}
$$

Из (19) – (22) следуют уравнения для внутренней энергии фаз:

$$(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1u_1}{dt}=-\frac{\partial I_i^{(q_1)}}{\partial x_i}+q_{12}+q_{13}-p^{(1)}\frac{\partial v_i^{(1)}}{\partial x_i}-\tau_{ij}^{(1)}\frac{\partial v_i^{(1)}}{\partial x_j}-R_i^{(12)}v_i^{(1)}-R_i^{(13)}v_i^{(1)}$$

$$w_2\rho\frac{d_2u_2}{dt}=-\frac{\partial I_i^{(q_2)}}{\partial x_i}+q_{12}-q_{23}-p^{(2)}\frac{\partial v_i^{(2)}}{\partial x_i}-\tau_{ij}^{(2)}\frac{\partial v_i^{(2)}}{\partial x_j}-R_i^{(12)}v_i^{(2)}+R_i^{(23)}v_i^{(2)}$$

$$w_3\rho\frac{d_3u_3}{dt}=-\frac{\partial I_i^{(q_3)}}{\partial x_i}-q_{32}+q_{13}-p^{(3)}\frac{\partial v_i^{(3)}}{\partial x_i}-\tau_{ij}^{(3)}\frac{\partial v_i^{(3)}}{\partial x_j}+R_i^{(32)}v_i^{(3)}-R_i^{(13)}v_i^{(3)} \quad (23)$$

и их энтальпий:

$$(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1h_1}{dt}=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(1)}v_j^{(1)}+I_i^{(q_1)})+q_{12}+q_{13}+(1-w_1-w_2)\rho g_i v_i^{(1)}-$$

$$-(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1}{dt}\frac{1}{2}(v^{(1)})^2+(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1}{dt}(p^{(1)}\rho^{-1}),$$

$$w_2\rho\frac{d_2h_2}{dt}=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(2)}v_j^{(2)}+I_i^{(q_2)})-q_{12}+q_{23}+w_2\rho g_i v_i^{(2)}-w_2\rho\frac{d_2}{dt}\frac{1}{2}(v^{(2)})^2+$$

$$+w_2\rho\frac{d_2}{dt}(p^{(2)}\rho^{-1}),$$

$$w_3\rho\frac{d_3h_3}{dt}=-\frac{\partial}{\partial x_i}(P_{ij}^{(3)}v_j^{(3)}+I_i^{(q_3)})+q_{32}-q_{13}+w_3\rho g_i v_i^{(3)}-w_3\rho\frac{d_3}{dt}\frac{1}{2}(v^{(3)})^2+$$

$$+w_3\rho\frac{d_3}{dt}(p^{(3)}\rho^{-1}). \quad (24)$$

Уравнения Гиббса для трехфазной системы:

$$(1-w_1-w_2)\rho T_1\frac{d_1s_1}{dt}=(1-w_1-w_2)\rho\frac{d_1u_1}{dt}+p^{(1)}\frac{\partial v_i^{(1)}}{\partial x_j},$$

$$w_2\rho T_2\frac{d_2s_2}{dt}=w_2\rho\frac{d_2u_2}{dt}+p^{(2)}\frac{\partial v_i^{(2)}}{\partial x_j}, \quad (25)$$

$$w_3\rho T_3\frac{d_3s_3}{dt}=w_3\rho\frac{d_3u_3}{dt}+p^{(3)}\frac{\partial v_i^{(3)}}{\partial x_j},$$

Используя промежуточное дифференциальное уравнение эксергии (18) и уравнения (1–25), получим окончательную форму локального дифференциального уравнения баланса эксергии трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=1}^{3} \ \tau_e^{(k)} I_i^{(q_k)} + P_{ij}^{(k)} v_j^{(k)} + e_k I_i^{(k)} + w_k p \ \ v_i^k - v_i^{\text{цм}} \ \ -$$

$$-T_0 [\sum_{k=1}^{3} (-\frac{I_i^{(q_k)}}{T_k^2} \frac{\partial T_k}{\partial x_i} - \frac{\tau_{ij}^{(k)}}{T_k} \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial x_i}) + \sum_{\substack{l=1 \\ l<k}}^{2} \sum_{\substack{k=1 \\ l \neq k}}^{3} (R_i^{(lk)} (\frac{v_i^{(l)}}{T_l} - \frac{v_i^{(k)}}{T_k}) + q_{lk} (\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_k})] +$$

$$+\rho \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{3} w_k \rho \frac{p^{(k)}}{\rho_k^2} - \frac{\rho \ \ e - e_3}{1 - w_3} \frac{dw_3}{dt}. \tag{26}$$

В этом выражении слагаемые, стоящие под знаком дивергенции, определяют полный поток всех видов эксергии в системе, а слагаемые с сомножителем T_0 – эксергетические потери, обусловленные необратимостью процессов. Эти потери связаны с теплопроводностью и вязкостью фаз, межфазным теплообменом и трением между фазами. Полученное уравнение может быть использовано для решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах, использующих в качестве теплоносителей многофазные среды переменной массы.

Выводы

1. Разработана макроскопическая модель поведения трехфазной термодинамической системы переменной массы при изменении концентрации одной из фаз.

2. С использованием эксергетических методов и методов термодинамики необратимых процессов получено локальное дифференциальное уравнение эксергетического баланса для указанной системы, которое учитывает эксергетические потери в термодинамической системе, связанные с теплопроводностью и вязкостью фаз, межфазным теплообменом и трением между фазами.

3. Полученное уравнение может быть использовано для решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах, использующих в качестве теплоносителей многофазные среды переменной концентрации.

Список литературы

1. Фиалко Н. М. Эффективность агрегатированных теплоутилизационных систем для котельных с поверхностными конденсационными теплоутилизаторами / Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская и др. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №3. – С. 63 – 71.

2. Гомон В. И. Утилизация теплоты запыленных отходящих газов стекловаренных печей / В. И. Гомон, А. И. Ратушняк, В. Т. Чернецкий и др. // Стекло и керамика. – 1989. – № 4. – С. 3–5.

3. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика / И. Дьярмати. – М.: Издательство «Мир», 1974. – 247с.

4. Эксергетический метод и его приложения / Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Издательство «Мир». – 1967. – 247с.

5. Белоусов В.С. Развитие методов эксергетического анализа и исследование процессов в однофазных и дисперсных средах на основе неравновесной термодинамики: автореф. дис. д-ра техн. наук / УГТУ - УПИ. - Екатеринбург, 2003. – 48 с.

МАКРОСКОПІЧНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗМІННОЇ МАСИ

А. І. Степанова

Анотація. *Пропонується макроскопічна модель трифазної термодинамічної системи із змінною концентрацією однієї з фаз і наводиться висновок локального диференціального рівняння ексергетичного балансу, яке може бути використане для вирішення оптимізаційних задач в теплоутилізаційних системах.*

Ключові слова: ***ефективність, оптимізація, теплоутилізаційна система***

MACROSCOPIC MODEL OF THREE-PHASE THERMODYNAMIC SYSTEM OF VARIABLE MASS

A. Stepanova

Annotation. *It proposed macroscopic model of a three-phase thermodynamic system with a variable concentration of one of the phases and provides the output of the local differential equation of exergy balance, which can be used to solve optimization problems in the heat recovery systems.*

Key words: ***efficiency, optimization, thermoutilyzing boiler system***