

ФРОЛОВ С.Д.

СМАНЦЕР В.В.

ВОДОЛАЗЧЕНКО А.В.

СЛИТВИН А.В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОГО КОНДЕНСАТОРА ПТУ

Одним из основных агрегатов системы ввода и регенерации воды парогазотурбинных установок (ПТУ) является конденсатор, установленный за котлом-утилизатором (К-У). Изъятая в нем из продуктов сгорания вода затем снова подается на вход в установку. От всех существующих типов конденсаторов вихревой конденсатор-сепаратор (ВКС) выгодно отличается компактностью, простотой конструкции и малой металлоемкостью. В таком аппарате конденсация водяного пара происходит на разбрызгиваемых в нем каплях холодной воды. В гетерогенной среде проявляется межфазное силовое и тепломассообменное взаимодействие газообразной (парогаз) и жидкой (холодные капли) фаз. Поскольку на выходе из К-У перегретый пар в смеси с продуктами сгорания за счет отвода от него теплоты в парогенерирующий контур становится влажным паром, парогазовая смесь на выходе из К-У представляет собой равновесную смесь продуктов сгорания, сухого насыщенного пара и равновесного с ним конденсата. Следствием взаимодействия такой смеси с холодными каплями в ВКС будет охлаждение газообразной фазы, изменение парциального давления насыщенной паровой фракции, т.е. увеличение массовой доли конденсированной фракции. Одновременно за счет контакта с холодной поверхностью капель часть массы влажного пара осядет на них. При этом оседать будет и конденсированная фракция влажного пара. Теплота, подведенная к межфазной поверхности, проникает внутрь жидкой фазы и идет на ее подогрев, т.е. на нагрев исходной массы холодной жидкости.

При разработке математической модели конденсатора принимаются следующие допущения, уже проверенные практикой:

- течение в целом энергоизолированное, одномерное и стационарное, вторичные течения не учитываются;
- компоненты газообразной фазы и парогазовая смесь в целом являются совершенными газами (удовлетворяют уравнению Клапейрона-Менделеева, теплофизические параметры фаз зависят только от температуры);
- вязкость несущей фазы проявляется только вблизи межфазной поверхности;
- все капли имеют сферическую форму и одинаковый размер, который меняется только из-за конденсации и осаждения на них конденсата влажного пара;
- возможная деформация капель учитывается только при определении коэффициента их аэродинамического сопротивления;
- лучистый теплообмен между фазами пренебрежимо мал.

Система дифференциальных уравнений математической модели получена из основной системы уравнений механики гетерогенных сред с учетом принятых допущений и пренебрежения (из-за их малости) членами, учитывающими изменения импульса и диссипацию механической энергии фаз вследствие фазовых переходов и записывается в цилиндрической системе координат:

$$\frac{d\rho}{dr} = \rho_e \frac{W_{e\varphi}^2}{r} + \frac{(\bar{F}_{me})_r}{1-\alpha} = \Phi_2; \quad (1)$$

$$\frac{dW_{mr}}{dr} = \frac{1}{W_{mr}} \left[\frac{W_{m\varphi}^2}{r} - \frac{\Phi_2}{\rho_m} - \frac{(\bar{F}_{me})_r}{\alpha \rho_m} \right] = \Phi_3; \quad (2)$$

$$\frac{dW_{m\varphi}}{dr} = - \left[\frac{W_{m\varphi}}{r} + \frac{(\bar{F}_{me})_\varphi}{\alpha \rho_m W_{mr}} \right] = \Phi_4; \quad (3)$$

$$\frac{dW_{e\varphi}}{dr} = - \left[\frac{W_{e\varphi}}{r} - \frac{(\bar{F}_{me})_\varphi}{(1-\alpha)\rho_e W_{er}} \right] = \Phi_5; \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_m}{dr} = \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{W_{mr}} \Phi_3 \right) - \frac{1}{\alpha} \frac{J_{me}}{W_{mr}} + \rho_m \Phi_1 - \Phi_5; \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma}{dr} = \frac{\sigma_v}{\rho_m} \Phi_5 - \frac{J_{\delta e}^{(v)}}{\rho_m W_{mr}} - \Phi_7; \quad (6)$$

$$\frac{dT_e}{dr} = \frac{q_{mb} + J_{\delta e}^{(v)} \cdot \psi_\delta + J_{me} c_e (T_\delta - T_e)}{(1-\alpha) \rho_e c_e W_{er}} - \Phi_8; \quad (7)$$

$$\frac{dT_m}{dr} = \frac{1}{\rho_m c_{\rho m}} \left(\Phi_2 + \frac{q_{mb}}{\alpha W_{mr}} \right) = \Phi_9. \quad (8)$$

Замыкает систему уравнение динамического радиального равновесия капель

$$\frac{W_{er}^2}{r} = \frac{1}{\rho_e} \frac{d\rho}{dr} - \frac{(\bar{F}_{me})_r}{(1-\alpha)\rho_e}. \quad (9)$$

Уравнение (5) с учетом (9) вырождается в равенство

$$W_{er} = \text{const} = W_{ero}. \quad (10)$$

Дополняют основную систему уравнений известные соотношения для газовых смесей и корреляционные зависимости теплофизических свойств компонентов фаз от параметров состояния.

Для описания переноса массы парового и конденсированного компонентов влажного пара используется предложенный Д. Сполдингом метод расчета скорости переноса массы, основанный на идее Рейнольдса об аналогии конвективного теплопереноса и массопереноса.

В результате скорость межфазного переноса массы вещества влажного пара, отнесенная к единице объема гетерогенного потока

$$J_{me} = J_{\delta e}^{(v)} + J_{\delta e}^{(k)} = \delta \frac{1-\alpha}{\delta_k} (\dot{m}_v'' + \dot{m}_k''), \quad (11)$$

где

$$\dot{m}_v'' = -\sigma_R B_v \quad (I2)$$

и

$$\dot{m}_k'' = -\dot{\sigma}_R B_k = \sigma_R \cdot \sigma_k \quad (I3)$$

Здесь движущая сила массопереноса пара

$$B_v = \frac{\sigma_v(T_m) - \sigma_v(T_0)}{\sigma_v(T_0) - 1}; \quad (I4)$$

$$\sigma_v(T_m) = \frac{\dot{m}_v(T_m)}{\dot{m}_g + \dot{m}_v(T_m) + \dot{m}_k(T_m)}; \quad (I5)$$

$$\sigma_v(T_0) = \frac{\dot{m}_v(T_0)}{\dot{m}_g + \dot{m}_v(T_0)}. \quad (I6)$$

Величину потока Рейнольдса (или массопроводность) определяет соотношение

$$\sigma_R = \alpha_T / G \rho_m \quad (I7)$$

Поток массы парогазовой фазы определяется как

$$\dot{m}_g = 0,622 \dot{m}_g \frac{P_s(T)}{P - P_s(T)}. \quad (I8)$$

Известно, что

$$q_{m0} = 6\alpha_T \frac{1-\alpha}{\delta_k} (T_m - T_0). \quad (I9)$$

и

$$\alpha_T = (2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}) \cdot \lambda_m / \delta_k, \quad (20)$$

а также

$$q_{l0} = \alpha_k (T_0 - T_e) \cdot \pi \delta_k^2. \quad (21)$$

где коэффициент теплоотдачи от поверхности капли к заполняющей ее жидкости можно определить по соотношению [2] :

$$\alpha_k = Nu_k \cdot \lambda_e / \delta_k. \quad (22)$$

$$Nu_K = \begin{cases} 16 & \text{при } \alpha > 0,74; \\ 4Ja & \text{при } \alpha \leq 0,74, \end{cases} \quad (23)$$

где

$$Ja = C_e \rho_e (T_\delta - T_e) / (\psi \cdot \rho_m). \quad (24)$$

Температуру δ - слоя находим методом итерации из уравнения теплового баланса в этом слое

$$16 \frac{\lambda_e}{\delta_K} \delta \frac{1-\alpha}{\delta_K} (T_\delta - T_e) = \delta \alpha_T \frac{1-\alpha}{\delta_K} (T_m - T_\delta) + J_{\delta e}^{(v)} \psi, \quad (25)$$

где

$$J_{\delta e}^{(v)} = m_v'' \cdot \delta \frac{1-\alpha}{\delta_K} \quad (26)$$

Текущий диаметр капле определяется как

$$\delta_K = \delta_{KK} \sqrt[3]{1 - (\dot{m}_v + \dot{m}_K) / m_{eK}} \quad (27)$$

Плотности газовой и паровой фаз можно определить как

$$\rho_g = [P - P_s(T_m)] / (R_g T_m); \quad (28)$$

$$\rho_v = P_s(T_m) / (R_v T_m), \quad (29)$$

а силы взаимодействия фаз в виде

$$(\bar{F}_{me})_r = \frac{3}{4} C_d \rho_m \frac{1-\alpha}{\delta_K} |W_{mr} - W_{er}| (W_{mr} - W_{er}) \quad (30)$$

$$(\bar{F}_{me})_\varphi = \frac{3}{4} C_d \rho_m \frac{1-\alpha}{\delta_K} |W_{m\varphi} - W_{e\varphi}| (W_{m\varphi} - W_{e\varphi}) \quad (31)$$

Поскольку переменные величины взаимосвязаны между собой, их нельзя задавать на входе в агрегат произвольно. Поэтому в исходных данных задаются только конструктивные - R_o , h_o , φ_o и режимные параметры \dot{m}_g , \dot{m}_{vo} , \dot{m}_{ko} , T_{mo} , δ_{KK} , а на выходном радиусе T_{ek} , \dot{m}_{ek} . Остальные параметры подсчитываются по алгебраическим соотношениям математической модели, приведенным выше, а также по

$$W_{m\varphi o} = W_{m\tau o} \cdot tg \varphi_o. \quad (32)$$

и

$$W_{cyo} = W_{mco} \sqrt{\frac{\rho_{mo}}{\rho_e} \left[1 - \frac{3}{4} R_o \frac{C_{do}}{\delta_{ko}} |W_{mro} - W_{cro}| (W_{mro} - W_{cro}) / W_{mco}^2 \right]} .$$

Исходную величину T_{eo} получаем из приближенного балансного соотношения

$$\dot{m}_{ek} C_e (T_{eo} - T_{ek}) = \dot{m}_{mo} \cdot C_{pm} (T_{mo} - T_{mk}) + \dot{m}_{vo} \psi_0 . \quad (34)$$

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИНДЕКСЫ,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сполдинг Д.Б. Конвективный массоперенос. - М.-Л., Энергия, 1965, 384с.
2. Solbrig C.W., Mc Fadden I.H., Lyczkowski R.W., Huyhes E.D. Heat transfer and friction correlations required to describe steam-water behavior in nuclear safety studies. - AIChE Symp. Ser., 1978, 74, N 174., p. 100-128.

УДК 536.8:621.438

П.П. КОСТЕНКО, Д.А. МУНДШТУКОВ

ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОНВЕРСИЕЙ ТОПЛИВА В ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ЦИКЛЕ

Одним из наиболее перспективных методов повышения экономичности энергетических установок и двигателей является термохимическая регенерация теплоты выхлопных газов, когда эту теплоту передают топливу и осуществляют его конверсию. Но конверсия топлива возможна лишь в стехиометрических продуктах сгорания. У современных же ГТД коэффициент избытка воздуха в камере сгорания существенно выше единицы. Введение топлива в отработавшие газы приводило бы в таком случае к его окислению избыточным кислородом, т.е. к его бесполезному сгоранию, а вовсе не к конверсии.