



УДК 539.422.2

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКЦИОННЫХ ТРУБ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

А. Г. Хакимов, Н. М. Цирельман

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Аннотация. Исследуется напряженно-деформированное состояние реакционных труб нефтехимической аппаратуры с учетом неоднородного температурного поля.

Ключевые слова: моделирование, напряженно-деформированное состояние, реакционные трубы, температурное поле

1. Введение

Длительное разрушение металлов и сплавов при высоких температурах служило предметом многочисленных исследований [1]. В этой области накоплен большой опытный материал, однако вопрос об экстраполяции данных по длительной прочности не может считаться решенным. Также существенную роль играют условия эксплуатации. Расчет по средним значениям напряжений приводит к неверным выводам. Существенную роль в распределении напряжений играет температурное поле. Наблюдаемые в условиях реальной эксплуатации реакционных труб трещины, направленные по образующей на внутренней поверхности труб, соответствуют распределению напряжений по радиусу трубы. Исследования микроструктуры металла в бездефектной зоне и дефектной зоне говорят о том, что внешняя поверхность трубы подвергалась перегреву до 1100°C. Видно, что карбиды, располагавшиеся по границам зерен в бездефектной зоне, при перегреве располагаются хаотически в самом зерне.

При этом происходит изменение физико-механических и теплофизических свойств металла трубы. Согласно регламенту эксплуатации температура металла на внешней поверхности не должна превышать 935°C , а на внутренней поверхности труб температура должна определяться с учетом того, что природный газ входит в трубу с температурой 450°C и течет по зернистому слою (катализатору). Требуется определить распределение температур в стенке трубы и ресурс работы неперегревавшихся и перегревавшихся труб.

2. Определение стационарного теплового состояния трубы

В установках по производству водорода внутри вертикальной реакционной трубы с катализатором течет природный газ. Ряд реакционных труб находится в печи. Тепловой поток направлен от печи к природному газу, текущему по зернистому слою внутри трубы. Тепловой поток от стенки трубы распределяется на тепловой поток через контактные поверхности стенки трубы и катализатора, лучистый тепловой поток от стенки трубы к катализатору, конвективный тепловой поток от стенки трубы к газовому потоку, лучистый тепловой поток от стенки трубы к газовому потоку. Тепловой поток от катализатора к газовому потоку также имеет две составляющие: конвективную и лучистую. Учитывается пристеночный теплообмен.

Конвективная теплоотдача от газа печи реакционной трубе описывается соотношениями [2] (для газов, у которых число Прандтля $\text{Pr} \approx 0.73$)

$$\text{Nu} = 0.702\text{Gr}^{0.25}, \quad 10^3 < \text{Ra} < 10^9, \quad (1)$$

$$\text{Nu} = 0.135\text{Gr}^{0.33}, \quad \text{Ra} > 10^9, \quad (2)$$

где $\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$ — число Рэлея; $\text{Nu} = \alpha_2 d / \lambda_2$ — число Нуссельта; $\text{Pr} = \nu / a_2$ — число Прандтля; $\text{Gr} = g\beta_2(T_{\Gamma} - T_3)d^3 / \nu_2^2$ — число Грасгофа; $a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$; T_3 — температура поверхности слоя загрязнения; T_{Γ} — температура газа в печи; α_2 — коэффициент теплоотдачи между газом и слоем загрязнений; λ_2 , β_2 — коэффициент теплопроводности и температурный коэффициент расширения газа; ρ_2 — плотность газа; d — диаметр трубы; ν_2 , a_2 , c_2 — кинематическая вязкость, коэффициент температуропроводности и удельная теплоемкость газа. В уравнениях (1), (2) в качестве определяющей температуры [2] принята температура окружающего газа T_{Γ} , в качестве определяющего размера — диаметр трубы d .

В этом случае для заданных параметров дымовых газов безразмерный коэффициент теплоотдачи от газа стенке определяется по формуле

(2).

Теплообмен излучением описывается законом Стефана-Больцмана [3]

$$q_{\text{изл}} = \sigma_0 \psi_2 \varepsilon_{T2} (T_{\Gamma}^4 - T_3^4),$$

где $q_{\text{изл}}$ — поверхностная плотность энергии излучения; $\sigma_0 = 5.67032 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана; ψ_2 — коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны; ε_{T2} — степень черноты поверхности.

Суммарная плотность теплового потока q от газа определяется выражением

$$q = \alpha_2 (T_{\Gamma} - T_3) + \sigma_0 \psi_2 \varepsilon_{T2} (T_{\Gamma}^4 - T_3^4). \quad (3)$$

Плотность теплового потока между внешним слоем загрязнений и внешней стенкой трубы [3] находится по формуле

$$q = \frac{1}{R_{\Gamma}} (T_3 - T_2), \quad R_{\Gamma} = \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (4)$$

где R_{Γ} , δ_3 , λ_3 — термическое сопротивление, толщина и коэффициент теплопроводности слоя загрязнений; T_2 — температура внешней стенки трубы.

Температурное поле в трубе в установившемся режиме описывается формулой

$$T = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot \ln \frac{r}{a}}{\ln \frac{b}{a}}, \quad (5)$$

где T_1 — температура внутренней стенки трубы; r — радиальная координата; a , b — внутренний и наружный радиусы трубы; T — текущая температура.

Градиенты температуры на внутренней и внешней поверхности трубы определяются как

$$\frac{dT}{dr} = \frac{(T_2 - T_1)}{a \cdot \ln \frac{b}{a}} \quad (r = a), \quad \frac{dT}{dr} = \frac{(T_2 - T_1)}{b \cdot \ln \frac{b}{a}} \quad (r = b), \quad (6)$$

а плотности теплового потока q равны соответственно на внутренней поверхности трубы ($r = a$)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = -\lambda \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{a \cdot \ln \frac{b}{a}} \quad (7)$$

и на внешней поверхности трубы ($r = b$)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = -\lambda \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{b \cdot \ln \frac{b}{a}}, \quad (8)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала трубы.

Плотность теплового потока между внутренним слоем загрязнений и внутренней стенкой трубы определяется по формуле

$$q = \frac{1}{R_{T1}} \cdot (T_1 - T_{31}), \quad R_{T1} = \frac{\delta_{31}}{\lambda_{31}}, \quad (9)$$

где R_{T1} , δ_{31} , λ_{31} — термическое сопротивление, толщина и коэффициент теплопроводности слоя загрязнений на внутренней поверхности трубы; T_{31} — температура поверхности слоя загрязнений на внутренней стенке трубы.

Теплообмен в катализаторе внутри трубы происходит следующим образом. Тепловой поток от стенки трубы распределяется на тепловой поток через контактные поверхности стенки трубы и катализатора, лучистый тепловой поток от стенки трубы к катализатору, конвективный тепловой поток от стенки трубы к газовому потоку, лучистый тепловой поток от стенки трубы к газовому потоку. Тепловой поток от катализатора к газовому потоку также имеет две составляющие: конвективную и лучистую.

Поэтому плотность теплового потока от слоя загрязнений на внутренней поверхности трубы к катализатору и в газовый поток может быть представлена в виде:

$$q = f_1 q_1 + f_2 q_2 + f_3 q_3 + f_4 q_4, \quad f_1 + f_3 = 1, \quad f_2 + f_4 = f_3, \quad (10)$$

где f_1 , f_3 — отношение площади контакта катализатора и стенки к общей площади внутренней стенки трубы, отношение площади свободной поверхности стенки трубы к общей площади внутренней стенки трубы; q_1 , q_2 , q_3 , q_4 — плотности тепловых потоков: теплового потока через контактные поверхности стенки трубы и катализатора, лучистого теплового потока от стенки трубы к катализатору, конвективного теплового потока от стенки трубы к газовому потоку, лучистого теплового потока от стенки трубы к газовому потоку, соответственно. Выражение (10) может быть записано в виде:

$$q = f_1 \frac{\lambda_K}{\delta_K} (T_{31} - T_K) + f_2 \sigma_0 \psi_1 \varepsilon_{T1} (T_{31}^4 - T_K^4) + f_3 \alpha_0 (T_{31} - T_0) + f_4 \sigma_0 \psi_0 \varepsilon_{T0} (T_{31}^4 - T_0^4), \quad (11)$$

где δ_K , λ_K — толщина и коэффициент теплопроводности катализатора; T_K , T_0 — температура поверхности катализатора и газового потока; ψ_1 — коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны; ε_{T1} — степень черноты поверхности; ψ_0 — коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны; ε_{T0} — степень черноты поверхности; α_0 — коэффициент теплоотдачи между слоем загрязнений и газовым потоком, который определяется из соотношений [2]:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{ост}} &= f_1(\text{Re}_{\text{ст}}, \text{Pr}_{\text{ст}}) \quad (\text{Nu}_{\text{ост}} = \frac{\alpha_0 d}{\lambda_{\text{ост}}}), \\ \text{Re}_{\text{ст}} &= \frac{w d \rho_{\text{ост}}}{\mu_{\text{ост}}}, \quad \text{Pr}_{\text{ст}} = \frac{\mu_{\text{ост}} c_{\text{ост}}}{\lambda_{\text{ост}}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где Nu — число Нуссельта; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; T — температура; w — скорость газа в трубе; λ , ρ , μ , c — коэффициент теплопроводности, плотность, коэффициент динамической вязкости и удельная теплоемкость газа, индекс «0» относится к параметрам газового потока в трубе, величины с индексом «ст» вычисляются по температуре стенки, $\text{Re}_{\text{вх}}$ вычисляется по температуре газа на входе.

Плотность теплового потока от катализатора в газовый поток может быть представлена в виде:

$$f_1 q_1 + f_2 q_2 = q_5 + q_6, \quad (13)$$

где q_5 , q_6 — плотности конвективного теплового потока от катализатора к газовому потоку и лучистого теплового потока от катализатора к газовому потоку. Выражение (13) может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} f_1 \frac{\lambda_K}{\delta_K} (T_{31} - T_K) + f_2 \sigma_0 \psi_1 \varepsilon_{T1} (T_{31}^4 - T_K^4) = \\ = \alpha_{\text{ок}} (T_K - T_0) + \sigma_0 \psi_{\text{ок}} \varepsilon_{\text{ток}} (T_K^4 - T_0^4), \end{aligned}$$

где $\psi_{\text{ок}}$ — коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны; $\varepsilon_{\text{ток}}$ — степень черноты поверхности; $\alpha_{\text{ок}}$ — коэффициент теплоотдачи между катализатором и газовым потоком, который определяется из соотношений [2]

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{ок}} &= f_2(\text{Re}_{\text{ок}}, \text{Pr}_{\text{ок}}), \quad \text{Nu}_{\text{ок}} = \frac{\alpha_{\text{ок}} d}{\lambda_{\text{ок}}}, \\ \text{Re}_{\text{ок}} &= \frac{w d \rho_{\text{ок}}}{\mu_{\text{ок}}}, \quad \text{Pr}_{\text{ок}} = \frac{\mu_{\text{ок}} c_{\text{ок}}}{\lambda_{\text{ок}}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где величины с индексом «ок» вычисляются по температуре катализатора.

Основное уравнение химической реакции следующее: каталитическая конверсия газа с водяным паром при температуре 750°C – 850°C в присутствии Ni на Al_2O_3 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2 - 206$ кДж. Примем, что скорость химической реакции пропорциональна температуре газового потока и концентрации реагирующих компонентов.

Уравнение теплового баланса в реагирующем газовом потоке с подводом тепла для 1 моля метана и 1 моля водяного пара в начальный момент времени на входе в реакционную трубу

$$\begin{aligned} \frac{P}{RT}(F_1 C_{p\mu 1} + F_2 C_{p\mu 2} + F_3 C_{p\mu 3} + F_4 C_{p\mu 4}) \frac{dT}{dt} = \\ = \frac{2\pi a}{K_{\text{пр}}} q + \frac{PQ^*}{RT} \cdot \frac{dF_1}{dt} - F \cdot w \cdot \frac{dP}{dz}, \end{aligned} \quad (15)$$

где F — площадь поперечного сечения трубы; $C_{p\mu}$ — молярная теплоемкость газа; P , T — давление и температура в газовом потоке; R — газовая постоянная; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент проницаемости; z — координата, направленная по оси трубы вниз; t — время; Q^* — количество тепла, необходимое для каталитической конверсии 1 моля метана ($Q^* = 206$ кДж/моль), индексы «1», «2», «3», «4» относятся к параметрам метана, водяного пара, окиси углерода, водорода, соответственно. Исследование изменения градиента давления dP/dz в трубе со слоем катализатора, гранулы которого имеют различное количество сквозных каналов, приводится в работах [4, 5].

Соотношения между F_i следующие (избыток пара равен 0):

$$F_1 : F_2 : F_3 : F_4 = \frac{M_1}{\mu_1} = \frac{M_2}{\mu_2} = \frac{M_3}{\mu_3} = \frac{M_4}{\mu_4}, \quad F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = F,$$

где M_i , μ_i — массовые расходы и молярные массы компонентов смеси; β_0 — температурный коэффициент расширения газа; ν_0 , c_0 — коэффициент вязкости и удельная теплоемкость газа. Формула (15) необходима для проведения расчетов по высоте реакционной трубы z .

Приравнявая плотности тепловых потоков на границах контакта, получим систему из восьми уравнений для данного z :

$$\begin{aligned}
 \text{Nu} &= 0.135\text{Gr}^{0.33}, \quad \text{Ra} > 10^9, \\
 \alpha_2(T_\Gamma - T_3) + \sigma_0\psi_2\varepsilon_{T2}(T_\Gamma^4 - T_3^4) &= \frac{1}{R_\Gamma}(T_3 - T_2); \\
 \frac{1}{R_\Gamma}(T_3 - T_2) &= -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{b \cdot \ln \frac{b}{a}}; \\
 -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{a \cdot \ln \frac{b}{a}} &= \frac{1}{R_{T1}}(T_1 - T_{31}); \\
 \frac{1}{R_{T1}}(T_1 - T_{31}) &= f_1 \frac{\lambda_K}{\delta_K}(T_{31} - T_K) + f_2\sigma_0\psi_1\varepsilon_{T1}(T_{31}^4 - \\
 &\quad - T_K^4) + f_3\alpha_0(T_{31} - T_0) + f_4\sigma_0\psi_0\varepsilon_{T0}(T_{31}^4 - T_0^4); \\
 f_1 \frac{\lambda_K}{\delta_K}(T_{31} - T_K) + f_2\sigma_0\psi_1\varepsilon_{T1}(T_{31}^4 - T_K^4) &= \\
 &= \alpha_{OK}(T_K - T_0) + \sigma_0\psi_{OK}\varepsilon_{ТОК}(T_K^4 - T_0^4), \\
 \text{Nu}_{OCT} &= \frac{\alpha_0 d}{\lambda_{OCT}}, \quad \text{Nu}_{OK} = \frac{\alpha_{OK} d}{\lambda_{OK}},
 \end{aligned} \tag{16}$$

с неизвестными α_0 , α_{OK} , T_K , T_{31} , T_1 , T_2 , T_3 , α_2 .

3. Определение напряжений

Радиальные и окружные температурные напряжения σ_r^T , σ_θ^T определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^T &= \frac{\alpha E(T_1 - T_2)}{2(1 - \nu) \ln \frac{b}{a}} \left[\frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \ln \frac{b}{a} - \ln \frac{b}{r} \right], \\
 \sigma_\theta^T &= \frac{\alpha E(T_1 - T_2)}{2(1 - \nu) \ln \frac{b}{a}} \left[1 - \ln \frac{b}{r} - \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \ln \frac{b}{a} \right],
 \end{aligned}$$

где α , E , ν — коэффициент линейного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала трубы; a , b — внутренний и внешний радиусы трубы; r — текущий радиус; T_1 , T_2 — температура на внутренней и внешней стенках трубы, определяемая из системы уравнений (16). Приведенное распределение окружных напряжений соответствует распределению температуры по радиусу (5).

Радиальные и окружные напряжения σ_r^p , σ_θ^p от действия перепада давления определяются

$$\sigma_r^p = \frac{p_1 \cdot a_T^2}{b^2 - a_T^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right), \quad \sigma_\theta^p = \frac{p_1 \cdot a_T^2}{b^2 - a_T^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right),$$

где p_1 — давление на внутренней поверхности трубы; давление на внешней поверхности трубы равно нулю; a_T — граница распространения радиальных трещин: $a \leq r \leq a_T$ — область трещин, $a_T \leq r \leq b$ — трещины отсутствуют.

Суммарное окружное напряжение σ_θ определяется

$$\sigma_\theta = \sigma_\theta^T + \sigma_\theta^p.$$

4. Заключение

При перегреве металла ресурс реакционных труб уменьшается. Проведение экспериментов по определению длительной прочности эксплуатировавшихся реакционных труб позволяет с помощью расчетов прогнозировать остаточный ресурс. При этом необходимо точно задавать распределение температуры по толщине трубы.

Список литературы

- [1] Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука. 1966. 752 с.
- [2] Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам. К.: Тэхника. 1990. 165 с.
- [3] Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
- [4] Котов В. Г., Черная Г. А., Складаров К. Б.. Исследование газодинамических характеристик слоя катализатора из гранул, имеющих сквозные каналы // Теоретические основы хим. технол. 1993. Т. 27, № 2. С. 173–177.
- [5] Бодров И. М., Апельбаум Л. О., Темкин М. И. Кинетика реакции метана с водяным паром, катализируемой никелем на пористом носителе // Кинетика и катализ. 1967. Т. 8, № 4. С. 821.