

УДК 536.24:621.1, 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКЦИОННОЙ КОЛОННЫ

*Р. Р. Мавлютов**, *Л. Н. Горчаков***, *Ш. Ш. Галялиев****,
*Н. М. Туйкин***, *А. Г. Хакимов**, *Н. М. Цирельман*****

* Институт механики УНЦ РАН, Уфа

** ЗАО НПО «Ленкор», Уфа

*** АО «Нижнекамскнефтехим», Уфа

**** Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Аннотация. Работа химических реакторов и, в частности, реакторов для получения бензола, связана с выделением большого количества тепла. Неправильно выбранные тепловые режимы эксплуатации элементов конструкции реакционной колонны при больших градиентах температур могут приводить к возникновению больших термических напряжений, которые уменьшают ресурс отдельных элементов установки.

Поэтому актуально на основе математического моделирования установить положительные и отрицательные эффекты в отношении напряженно-деформированного состояния элементов конструкции при различных режимах отвода тепла от наружной поверхности реакционной колонны.

Ключевые слова: Реакционная колонна, моделирование, термонапряженное состояние, орошение водой

1 Введение

Для решения данной задачи предварительно необходимо определить температуру элементов конструкции реакционной колонны при работе без орошения и с орошением водой и исследовать напряженно-деформированное состояние элементов конструкции при указанных режимах эксплуатации. Следует отметить, что также необходимо промоделировать аварийные режимы эксплуатации: отказ насосов и устройства орошения, орошение перегретой колонны холодной водой, локальный перегрев и охлаждение с целью определения напряженно-деформированного

состояния элементов конструкции колонны.

В настоящей работе рассматривается осесимметричное термонапряженное состояние цилиндрической части корпуса вертикальной реакционной колонны высотой L , внешним диаметром рабочей части $D = 2b$ и толщиной стенки h , когда внутренняя стенка колонны покрыта теплоизоляционным материалом толщиной h_1 .

2 Определение стационарного теплового состояния конструкции

Внутри реакционной колонны протекают процессы конвективного теплообмена и теплообмена излучением между газом с температурой T_r и теплоизоляционным материалом с коэффициентом теплопроводности λ_1 (Рис. 1). При этом тепловой поток проходит через теплоизоляционный материал и металлическую стенку колонны с коэффициентом теплопроводности материала λ . Кроме того, происходит конвективный теплообмен и теплообмен излучением между наружной поверхностью корпуса колонны и окружающей средой (воздухом) или со стекающей по стенке жидкой пленкой (при орошении водой).

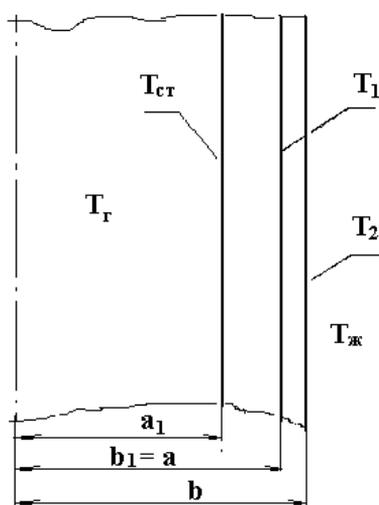


Рис. 1: Схема реакционной колонны

Конвективный теплообмен между газом, находящимся внутри ре-

акционной колонны, и вертикальной внутренней цилиндрической поверхностью большой протяженности (более 10 м) с числом Прандтля $Pr \approx 0,73$ описывается соотношением [1]

$$Nu = 0,135Gr^{0,33}, \quad Gr > 1,37 \cdot 10^9, \quad (1)$$

где $Nu = \alpha_1 L / \lambda_\Gamma$ — число Нуссельта, $Gr = g\beta_\Gamma(T_{CT} - T_\Gamma)L^3/\nu_\Gamma^2$ — число Грасгофа, T_{CT} — температура внутренней поверхности теплоизоляционного слоя, T_Γ — температура среды в реакционной колонне, α_1 — коэффициент конвективного теплообмена между газом и стенкой, g — ускорение свободного падения, λ_Γ , β_Γ и ν_Γ — коэффициент теплопроводности, температурный коэффициент расширения газа и кинематическая вязкость.

Теплообмен излучением описывается уравнением [2]:

$$E_{изл} = \sigma_0 \cdot \psi_1 a_{T1} (T_\Gamma^4 - T_{CT}^4), \quad (2)$$

где $E_{изл}$ — поверхностная плотность энергии излучения, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана, ψ_1 — коэффициент эффективности радиационных поверхностей зоны, a_{T1} — степень черноты поверхности.

Суммарная плотность теплового потока q к внутренней поверхности колонны со стороны газа определяется выражением

$$q = \alpha_1 (T_\Gamma - T_{CT}) + \sigma_0 \psi_1 a_{T1} (T_\Gamma^4 - T_{CT}^4). \quad (3)$$

Температурное поле в теплоизоляционном материале в установившемся режиме описывается формулой:

$$T(r) = T_{CT} + \frac{(T_1 - T_{CT}) \cdot \ln \frac{r}{a_1}}{\ln \frac{b_1}{a_1}}, \quad (4)$$

где T_1 — температура наружной поверхности теплоизоляционного слоя, r — радиальная координата, a_1 , b_1 — внутренний и наружный радиусы теплоизоляционного слоя, T — текущая температура.

Градиенты температуры на внутренней и внешней поверхности теплоизоляционного слоя определяются как:

$$\frac{dT}{dr}(a_1) = \frac{T_1 - T_{CT}}{a_1 \cdot \ln \frac{b_1}{a_1}}, \quad \frac{dT}{dr}(b_1) = \frac{T_1 - T_{CT}}{b_1 \cdot \ln \frac{b_1}{a_1}}, \quad (5)$$

а плотность теплового потока q на внутренней поверхности теплоизоляционного слоя находится по формуле:

$$q = -\lambda_1 \frac{dT}{dr}(a_1). \quad (6)$$

Условие равенства плотностей тепловых потоков на границе с учетом соотношений (3), (6), (5) приводит к соотношению:

$$\alpha_1(T_\Gamma - T_{CT}) + \sigma_0\psi_1 a_{T1}(T_\Gamma^4 - T_{CT}^4) = -\lambda_1 \cdot \frac{T_1 - T_{CT}}{a_1 \cdot \ln \frac{b_1}{a_1}}. \quad (7)$$

Плотность теплового потока q на внешней поверхности теплоизоляционного слоя определяется по формуле:

$$q = -\lambda_1 \frac{dT}{dr}(b_1). \quad (8)$$

Температурное поле в металлической стенке реакционной колонны в установившемся режиме описывается выражением:

$$T(r) = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot \ln \frac{r}{a}}{\ln \frac{b}{a}}, \quad (9)$$

а градиенты температуры на внутренней и внешней поверхности металлической стенки соответственно определяются:

$$\frac{dT}{dr}(a) = \frac{T_2 - T_1}{a \cdot \ln \frac{b}{a}}, \quad \frac{dT}{dr}(b) = \frac{T_2 - T_1}{b \cdot \ln \frac{b}{a}}, \quad (10)$$

где T_2 — температура внешней поверхности колонны. Плотность теплового потока через внутреннюю и внешнюю поверхность металлической стенки находится по формулам:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr}(a), \quad q = -\lambda \frac{dT}{dr}(b), \quad (11)$$

где a, b — внутренний и наружный радиусы металлической стенки колонны.

Для стационарного теплового режима, приравнявая правые части (8), (11), с учетом соотношений (5), (10), получаем условие для определения температур в конструкции:

$$\lambda_1 \frac{T_1 - T_{CT}}{b_1 \cdot \ln \frac{b_1}{a_1}} = \lambda \frac{T_2 - T_1}{a \cdot \ln \frac{b}{a}}. \quad (12)$$

Рассматриваются режимы теплоотдачи окружающей среде при отсутствии орошения и к стекающей по стенке жидкой пленке при орошении реакционной колонны водой.

2.1 Теплоотдача окружающей среде (воздуху) при отсутствии орошения

Тепловой поток от внешней поверхности реакционной колонны в окружающий воздух при отсутствии орошения описывается соотношением типа (1)

$$Nu = 0,135Gr^{0,33}, \quad Gr > 1,37 \cdot 10^9, \quad (13)$$

в котором числа Нуссельта и Грасгофа равны соответственно

$$Nu = \alpha_2 L / \lambda_2, \quad Gr = g\beta_2(T_2 - T_{\text{Ж}})L^3 / \nu_2^2,$$

где $T_{\text{Ж}}$ — температура окружающей среды, α_2 — коэффициент теплообмена между металлической стенкой и воздухом, ρ_2 — плотность воздуха, λ_2 , β_2 и ν_2 — коэффициент теплопроводности, температурный коэффициент расширения воздуха и кинематическая вязкость.

В качестве определяющей температуры при проведении расчетов принята температура окружающей среды $T_{\text{Ж}}$, а в качестве определяющего размера — высота колонны L .

Суммарная плотность теплового потока q от металлической стенки определяется выражением:

$$q = \alpha_2(T_2 - T_{\text{Ж}}) + \sigma_0\psi_2 a_{\text{T}2}(T_2^4 - T_{\text{Ж}}^4). \quad (14)$$

Условие равенства плотностей тепловых потоков на границе с учетом соотношений (11), (14), (10), дает:

$$\alpha_2(T_2 - T_{\text{Ж}}) + \sigma_0\psi_2 a_{\text{T}2}(T_2^4 - T_{\text{Ж}}^4) = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{b \cdot \ln \frac{b}{a}}. \quad (15)$$

Таким образом, имеем систему из пяти уравнений (1), (7), (12), (13), (15) из которых определяются неизвестные α_1 , $T_{\text{СТ}}$, T_1 , T_2 , α_2 .

В качестве примера в таблице приведены расчеты теплового состояния колонны для нижеследующих параметров со стороны газа: $T_{\text{Г}} = 700$ °С, $L = 12$ м, $g = 9,8$ м/с², $\lambda_{\text{Г}} = 68,1 \cdot 10^{-3}$ Вт/м · град, $\beta_{\text{Г}} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ 1/град, $\nu_{\text{Г}} = 79,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\psi_1 = 0,98$, $a_{\text{T}1} = 0,80$.

Со стороны окружающего воздуха было принято: $T_{\text{Ж}} = 20$ °С, $\lambda_2 = 26,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/м · град, $\beta_2 = 1,9 \cdot 10^{-3}$ 1/град, $\nu_2 = 14,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\psi_2 = 0,98$, $a_{\text{T}2} = 0,80$.

Параметры теплоизоляционного слоя и металлической стенки в расчете были приняты равными: $h_1 = 220$ мм, $\lambda_1 = 3,2$ Вт/м · град, $a_1 = 1300$ мм, $b_1 = 1520$ мм, $h = 30$ мм, $\lambda = 51,1$ Вт/м · град, $a = 1520$ мм, $b = 1550$ мм.

2.2 Теплоотдача к стекающей по стенке жидкой пленке при орошении реакционной колонны водой

Неустойчивость межфазной границы и связанные с ней волнообразование, возникновение сухих пятен, распад пленки на ручейки и т.д., должны учитываться при проектировании пленочных аппаратов [3]. Анализ устойчивости, выполненный в рамках линейной теории [4, 5], показывает, что при стекании пленок по вертикальной плоскости поверхность пленки всегда неустойчива, т. е. при любых расходах жидкости на поверхности пленки возникают волны. Этот теоретический результат подтвержден экспериментальными данными. В работах [4, 5, 6] классический анализ устойчивости пленки дополнен учетом влияния теплового потока. Однако количественные оценки работы [5] показывают, что влияние q на устойчивость поверхности пленки становится ощутимым при весьма значительных плотностях теплового потока, близких к значениям $q_{кр}$ при кипении. Результаты анализа устойчивости классическими методами не дают прямого ответа на вопрос о причинах возникновения при некоторых условиях сухих пятен на стенке и распада пленки на ручейки. Кроме того, неустойчивость растет с ростом расхода в пленке. Эксперименты же, напротив, указывают на то, что уменьшение расхода ниже некоторого минимального значения приводит к появлению устойчивых сухих пятен на поверхности и, в дальнейшем, к распаду пленки на ручейки.

Различные подходы и схемы анализа устойчивости сухого пятна и разрушение пленки, происходящее на поверхности в случае, когда расход жидкости в пленке становится меньше некоторого минимального значения, изложены в [7, 8, 9]. Однако практическая ценность предлагаемых расчетных формул ограничена в силу неопределенности краевого угла смачивания θ . Действительно, краевой угол смачивания — изменчивая характеристика, чрезвычайно чувствительная к малейшим примесям как в жидкости, так и на твердой поверхности. Об этом свидетельствует достаточно большой разброс опытных значений минимальной объемной плотности орошения и минимальной толщины пленки, приведенный в [6].

Если разрушение пленки жидкости, недогретой до точки кипения T_s на обогреваемой поверхности, происходит под влиянием термокапиллярных эффектов (обусловленных градиентом поверхностного натяжения [10]), то совершенно иными являются условия разрушения пленки при течении насыщенной жидкости. В этом случае, если скорость испарения жидкости мала по сравнению со скоростью звука в паре (число

Маха $M < 0,05$) и кинетические эффекты не существенны, то температура поверхности независимо от толщины равна T_s . Волновой характер движения в этих условиях изменяет лишь локальную плотность потока испаряющейся жидкости, но не температуру межфазной поверхности. При этом до начала закипания на достаточно толстой пленке (число Рейнольдса $Re > 400$) в экспериментах не наблюдали образования сухих пятен [10]. Последние возникали в результате достаточно интенсивного кипения (при $q > 100$ кВт/м² для воды при атмосферном давлении).

Исследования по разрушению пленки жидкости, нагретой до T_s , в частности, когда $T_s < 100$ °С (числа Прандтля около 4–5) довольно ограничены, тогда как для ряда областей практики весьма важно знание механизмов разрушения сплошности течения пленки и, следовательно, способов и методов воздействия на минимальную плотность орошения.

При количественном описании устойчивости пленок на обогреваемой поверхности используется такая характеристика, как предельная плотность теплового потока, когда при заданной плотности орошения появляется устойчивое сухое пятно, и дальнейшее увеличение тепловой нагрузки приводит к разрушению сплошности течения на значительной площади.

Теплоотдача к стекающей по стенке жидкой пленке под действием силы тяжести определяется по формулам [1, 11]:

$$\begin{aligned} Nu_{ЭК} &= \alpha_2 v_{ЭК} / \lambda_2 = 5,01 \cdot (Re_{ЭК})^{1/3} Pr^{1/3}, \quad Re_{ЭК} > 2 \cdot 10^3, \\ Nu_{ЭК} &= 0,67 \cdot (Re_{ЭК})^{0,11} (Pr \frac{v_{ЭК}}{L})^{1/6}, \quad Re_{ЭК} < 2 \cdot 10^3, \\ v_{ЭК} &= (\mu^3 / \rho^3 g)^{1/3}, \quad Re_{ПЛ} = 4\Gamma / \mu, \quad \Gamma = G_{Ж} / \Pi, \quad G_{Ж} = fG, \end{aligned} \quad (16)$$

где $v_{ЭК}$ — поперечный размер, μ — вязкость жидкости, ρ — плотность жидкости, $Re_{ПЛ}$ — число Рейнольдса пленки, Γ — массовая плотность орошения, f — площадь сечения, G — расход жидкости, Π — смоченный периметр, $Re_{ЭК}$ — эквивалентное число Рейнольдса, α_2 — коэффициент теплоотдачи, λ_2 — коэффициент теплопроводности жидкости. Теплофизические параметры жидкости в (16) определяются при средней температуре пленки.

Плотность теплового потока q от металлической стенки рассчитывается по формуле:

$$q = \alpha_2(T_2 - T_{Ж}) + \sigma_0 \psi_2 a_{Т2}(T_2^4 - T_{Ж}^4). \quad (17)$$

Условие равенства плотностей тепловых потоков на границе с учетом

Таблица

Параметры	Охлаждение воздухом	Орошение водой
Температура газа в колонне, °С	700	700
Температура внутренней стенки теплоизоляционного слоя, °С	658,69	638,22
Температура наружной стенки теплоизоляционного слоя, °С	245,85	42,45
Температура наружной металлической стенки, °С	242,62	37,78
Температура окружающей среды, °L	40	26
Перепад температур на теплоизоляционном слое, °С	412,85	596,25
Перепад температур на металлической стенке, °С	3,23	4,67
Суммарная плотность теплового потока от наружной металлической стенки, кВт/м ¹	9,45	7,87

соотношений (11), (17), (10) дает:

$$\alpha_2(T_2 - T_{\text{ж}}) + \sigma_0 \psi_2 a_{\text{T2}}(T_2^4 - T_{\text{ж}}^5) = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{b \cdot \ln \frac{b}{a}}, \quad (18)$$

так что по-прежнему имеем систему из пяти уравнений (1), (7), (12), (17), (18), решение которой позволяет определить α_1 , $T_{\text{ст}}$, T_1 , T_2 , α_2 . Результаты расчетов теплового состояния колонны при орошении водой с расходом 0,28 кг/с приводятся в таблице.

Рассмотрение данных таблицы свидетельствует о том, что при орошении реакционной колонны водой увеличивается перепад температур на теплоизоляционном слое и возрастает на 44 % плотность теплового потока от металлической стенки. При этом перепад температур на металлической стенке увеличивается незначительно.

3 Определение напряжений

Радиальные и окружные температурные напряжения σ_r^T , σ_θ^T определяются по формулам [12, 13]:

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

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

где α , E , ν — коэффициент линейного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала металлической стенки; r — текущий радиус.

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

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

где p_1 — избыточное давление внутри колонны, при этом давление на внешней поверхности колонны принимаем равным нулю.

Радиальные и окружные напряжения σ_r , σ_θ являются суммой соответствующих температурных напряжений и напряжений от давления

$$\sigma_r = \sigma_r^T + \sigma_r^p, \quad \sigma_\theta = \sigma_\theta^T + \sigma_\theta^p.$$

Определение температурных напряжений и напряжений от давления проведено для следующих данных: внутренний радиус металлической колонны $a = 1520$ мм, внешний радиус металлической колонны $b = 1550$ мм, температура на внутренней поверхности $T_1 = 42,45$ °С, температура на внешней поверхности $T_2 = 37,78$ °С, коэффициент линейного расширения $\alpha = 0,000017$ 1/град, модуль упругости $E = 0,2 \cdot 10^6$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, перепад давлений равен нулю. Напряжения при этом ($r = b$) равны: $\sigma_r^T = 11,3$ МПа, $\sigma_r^p = 0$, $\sigma_\theta^T = 0$, $\sigma_\theta^p = 0$.

Полученные соотношения позволяют определять поля напряжений в элементах конструкций при установившихся процессах теплообмена свободной конвекцией и излучением как без орошения, так и при орошении водой.

Список литературы

- [1] Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам. К.: Техника, 1990. 165 с.
- [2] Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
- [3] Кабаньков О. Н., Сукомел Л. А., Ягов В. В. Исследование теплообмена и границ устойчивости стекающих пленок жидкости по гладкой и структурированной поверхности // Испарение, конденсация. Тр. Первой Рос.нац.конф.по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1994. Т. 5. С. 63–68.
- [4] Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992.
- [5] Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении жидкости. Вильнюс: Вокслас, 1988.
- [6] Ганчев Б. Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [7] Hartley D. E., Mirgartyroyd W. Criteria for the breakup of thin liquid layers flowing isothermally over the solid surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 1964. V. 7. P. 1003–1015.
- [8] Ruckenstein E. On the break-up of thin liquid layers flowing along the surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 1971. V. 14, № 1. P. 161–169.
- [9] Bankoff S. G. Minimum thickness of a draining liquid film // Int. J. Heat Mass Transfer. 1971. V. 14, № 12. P. 2143–2146.
- [10] Fujita T., Ueda T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown // Int. J. Heat Mass Transfer. 1978. V. 21, № 2. P. 97–118.
- [11] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [12] Уилкинс М. Л. Расчет упругоэластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
- [13] Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.