О режимах заполнения барабанов котлов высокого давления при пуске из горячего состояния

Крамченков Евгений Михайлович, Стерлигов Вячеслав Анатольевич
ФГБОУ ВПО "Липецкий государственный технический университет"
Симиниченко Станислав Викторович,
ООО "Техника",
Шушунов Николай Васильевич, Стуканев Юрий Леонидович
ООО "Липецкпромэкспертиза"

Известные соотношения, используемые для расчета температурных напряжений в барабанах паровых котлов высокого давления при заполнении водой, температура которой отличается от температуры металла [1, 2], получены с использованием допущений о мгновенном поступлении в барабан всей массы участвующей в теплообмене воды и постоянстве коэффициента теплоотдачи между стенкой и жидкостью во времени и по окружной координате.

Указанные допущения противоречат реальной картине и не позволяют ответить на вопрос, как зависят температурные напряжения в барабане, возникающие при его заполнении, от длительности этого процесса. Сокращение времени заполнения котлов при большом числе их остановов с опережением может заметно повысить степень использования оборудования.

Ниже рассмотрена задача, в которой в опорожненный барабан в начальный момент времени начинает подаваться вода с заданным расходом и при температуре, отличной от температуры барабана.

Температурное поле в стенке барабана в рассматриваемом случае должно удовлетворять следующим соотношениям

$$\frac{\partial T}{\partial Fo}=\frac{\partial^2 T}{\partial R^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial T}{\partial R}+\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (1)$$

где $T=(t-\vartheta_0)/(t_0-\vartheta_0)$ - безразмерная температура стенки; $t,\ t_0$ - соответственно текущая и начальная температуры стенки; r — текущий радиус, $r_1\le r\le r_2;\quad R=r/r_1$ - безразмерный радиус (рис. 1); $Fo=a\times\tau/r_1^2$ - число Фурье (безразмерное время); a - коэффициент температуропроводности материала барабана; ϑ, ϑ_0 - соответственно текущая и начальная температура жидкости.

$$T\big|_{Fo=0}=1; \quad (2)$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial R}\right|_{R=R_2;\ 0\le\varphi\le\pi}=0; \quad (3)$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial R}\right|_{R=1;\,0\le\varphi\le\varphi_1} = -Bi\left(T\Big|_{R=1,0\le\varphi\le\bar{\varphi}} - \Theta\right); \quad (4)$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial R}\right|_{R=1;\,0\le\varphi\le\pi} = -Bi'\left(T\Big|_{R=1,0\le\varphi\le\pi} - \Theta'\right); \quad (5)$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right|_{\varphi=0,1\le R\le R_2} = \left.\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right|_{\varphi=\pi,1\le R\le R_2} = 0; \quad (6)$$

Здесь $\Theta = (\vartheta - \vartheta_0)/(t_0 - \vartheta_0); \quad \Theta' = (\vartheta' - \vartheta_0)/(t_0 - \vartheta_0)$ - безразмерные температуры соответственно жидкости и пара; $Bi = \alpha r_1/\lambda; \quad Bi' = \alpha' r_1/\lambda;$ - критерии Био для участков, омываемых жидкостью $(0 \le \varphi \le \varphi_1)$ и паром $(\varphi_1 \le \varphi \le \pi)$ соответственно; Θ — коэффициент теплопроводности материала барабана. Дифференциальное уравнение теплопроводности (1), начальное и краевые условия (2) — (6) должны быть дополнены уравнением теплового баланса

$$\vartheta = \frac{c_1\rho_1\pi\left(R_2^2-1\right)}{c_2\rho_2\left(\varphi_1 - 0,5\sin 2\varphi_1\right)}\left(1 - \frac{2}{\pi\left(R_2^2-1\right)}\int_1^{R_2}\int_0^{\pi} TR\,dR\,d\varphi\right) \quad (7)$$

$$\rho_2 r_1^2 l\left(\varphi_1 - 0,5\sin 2\varphi_1\right) = d\times\tau; \quad (8)$$

где c1, c2 - удельные массовые теплоемкости металла и жидкости соответственно; ρ_1, ρ_2 - плотности соответственно металла и жидкости; d — массовый расход воды, поступающей в барабан; l — длина барабана.

Условие (3) выражает предположение об идеальной тепловой изоляции наружной поверхности барабана. То, что тепловой поток через эту поверхность в действительности равен нулю, практически не отражается на значении температурных напряжений, обусловленных резким изменением условий теплообмена на внутренней поверхности [3].

При формулировке задачи принято также, что теплофизические свойства материала не зависят от температуры, а теплоемкость внутрибарабанных устройств пренебрежимо мала.

На практике чаще реализуется и представляет наибольший интерес случай, когда температура поступающей в барабан воды ниже температуры металла, превышающей в свою очередь температуру насыщения ts воды при атмосферном давлении, при котором происходит заполнение. Сложность определения температурного поля для названного случая обусловлена непостоянством коэффициента теплоотдачи от стенки к воде, который зависит от разности температур насыщения и поверхности (температурного напора), непрерывно уменьшающейся в процессе заполнения.

Уравнение (7) относится к периоду, когда вода еще остается недогретой до температуры насыщения. После того как эта температура достигается, значению Θ , вычисленному по уравнению (7), будет соответствовать $\vartheta \geq t_s$. В этом случае согласно реальной физической картине при вычислениях следует принимать $\vartheta = t_s$.

При $t_0 \geq \vartheta_0$ коэффициент теплоотдачи в области $\varphi_1 \leq \varphi \leq \pi$ весьма невелик: по оценке, выполненной согласно [4], не более 10 Вт/(м2 К). Поэтому критерий Bi' можно считать неизменным во времени.

В рассматриваемой задаче наибольшие температурные напряжения действуют в аксиальном направлении. Преобразовав содержащиеся в [5] выражения для этих напряжений к безразмерному виду, получим следующую формулу:

$$\bar{\sigma}_z = 1 - T - \frac{2}{\pi\left(R_2^2 - 1\right)} \int_1^R \int_0^\pi (1-T)\, RdRd\varphi - \frac{8R\cos\varphi}{\pi\left(R_2^4 - 1\right)} \int_1^R \int_0^\pi (1-T)\, R^2 \cos\varphi dRd\varphi;$$

(9)

где $\bar{\sigma}_z = \sigma_z / \left[\beta E\left(t_0 - \vartheta_0\right)\right]; \quad \sigma_z$ - аксиальные температурные напряжения; x - коэффициент линейного расширения; Е — модуль Юнга. Известная формула для расчета напряжений, обусловленных разностью температур верхней и нижней образующих барабана [6], является частным случаем соотношения (9), реализующимся при отсутствии перепада температуры по толщине стенки. Программа для решения уравнения (1) при условиях (2) — (8) и последующего расчета напряжений по формуле (9) была разработана на алгоритмическом языке PASCAL. Использовался метод конечных разностей - с центральными разностями по пространственным координатам и разностью вперед по времени. В слоях стенки барабана вблизи внутренней поверхности, контактирующей с водой, шаг по радиусу R ограничен сверху и должен удовлетворять неравенству

$$\Delta R \leq \frac{2}{Bi_{\max}};$$ (10)

где Bimax - максимальное значение критерия Био. Неравенство (10) вытекает из граничного условия (4), записанного в конечных разностях. Значение шага ΔΔ по полярному углу выбиралось из соображений точности расчета и экономии машинного времени. Шаг по времени находили из условия устойчивости расчетной схемы [7]:

$$\Delta Fo \leq \frac{0,5\Delta R^2 \Delta\varphi^2}{\left(\Delta R^2 + \Delta\varphi^2\right)};$$ (11)

При расчете с шагом ФR, определяемым из соотношения (10), получается очень большое число узлов сетки (более 1500), что приводит к нерациональным затратам машинного времени и излишне подробной информации о температурном поле в каждый расчетный момент времени. Поэтому расчетная сетка содержала две области, в одной из которых, заключенной между R1 и Ri ($1 \leq R_i \leq R_2$), принимался шаг ΔR в соответствии с неравенством (10), а в другой, заключенной между Ri и R2, принимался больший шаг R'. При расчете вычисляли сначала независимо друг от друга температуры во внутренних узлах обеих областей, а затем - температуры в узлах на окружности радиуса Ri из условия равенства производных от температуры по радиусу по обе стороны границы [8]:

$$T_{i,j} = \frac{-T_{i+2,j} + 4T_{i+1,j} + \Delta R' / \Delta R\left(4T_{i-1,j} - T_{i-2,j}\right)}{3\left(\dfrac{\Delta R'}{\Delta R} + 1\right)}; \quad (12)$$

где i — номер узла на радиусе; j — номер радиуса. Вычисления выполнены применительно к барабанам котлов, рассчитанных на давление 14 МПа и изготовленных из стали 16ГНМА (Dвн=1,6 м, l=16 м, s = 0,105 м) при 80 °С и различных температурах металла. При заполнении барабана с $\vartheta_0 =$ t0>100°С «холодной» водой ($\vartheta_0 \le t_0$) максимальный (начальный) температурный напор соответствует переходному режиму кипения. Затем, начиная с некоторого значения температурного напора, переходный режим сменялся пузырьковым. Для расчета коэффициента теплоотдачи в указанных режимах использовали формулы и рекомендации работы [9]. Расчетная сетка содержала 570 узлов: 38 - по полярному углу и 15 - по радиусу, причем пять из них находились в первой области, примыкающей к внутренней поверхности, а остальные - во второй. Шаг по времени Fo=3,46 10-3. Сравнение результатов расчета по мелкой сетке, содержащей 1596 узлов, и по описанной сетке, включающей две области, показало, что безразмерные температуры и напряжения отличаются в этих двух вариантах не более чем на 0,3 %. По изложенной методике рассчитали также температурное поле, не зависящее от полярного угла ($0 \le \varphi \le \pi$) при = 915 Вт/(м2 K), и сравнили с известным решением для пластины при граничных условиях третьего рода [10]. Расхождение не превысило 3 %. Наибольшие температурные напряжения в рассмотренной задаче действуют в зоне пересечения внутренней поверхности, контактирующей с водой, вертикальной плоскостью. После того как в барабан начнет поступать вода, эти напряжения быстро достигают максимума ($\overline{\sigma}_{z\max}$) и затем уменьшаются. Зависимость ($\overline{\sigma}_{z\max}$) от начальной температуры барабана, а также график их временной координаты представлены на рис. 2. Варьирование величины в области возможных на практике значений t0 при $\vartheta_0 \le t_0$ не приводит к заметному отличию значений ($\overline{\sigma}_{z\max}$) от определенных из рис. 2. Влияние расхода поступающей в барабан воды на безразмерные температурные напряжения ($\overline{\sigma}_{z\max}$) показано на рис. 3, на котором диапазон изменения расхода на оси абсцисс соответствует изменению длительности заполнения барабана от 3,2 до 0,64 ч. В пределах этой области интенсификация заполнения барабана при заданных t0 и ϑ_0 не увеличивает, а даже несколько снижает максимальные температурные напряжения в нем. Это объясняется тем, что степень стеснения тепловой деформации полосы металла, контактирующей с водой, тем выше, чем меньше ширина этой полосы, т. е. чем ниже уровень воды в барабане, а к моменту достижения кривой z=f(Fo) максимума уровень будет ниже при меньшем расходе воды. Соотношение (9) предполагает, что тепловое расширение и прогиб барабана не ограничиваются его креплениями и подсоединенными к нему трубами. Подчеркнем, что каково бы ни было фактическое влияние внешних связей на деформацию барабана, оно уменьшается со снижением уровня. В предельном случае, когда (полное защемление указанной выше полосы) независимо от характера внешних связей. Таким образом, следует констатировать, что температурные напряжения, возникающие при заполнении котла в барабане - наиболее толстостенном его элементе, не могут служить фактором, препятствующим его заполнению.

Список литературы

1. Расчет прочности трубопроводов энергоустановок для условий нестационарных температурных режимов. РТМ 24.038.11-72. Введен с 01.10.73.
2. Балашов Ю. В. Расчет допустимых температурных градиентов в барабанах паровых котлов высокого давления. Электрические станции, 1972, № 9, с. 26—28.
3. Балашов Ю. В. О влиянии качества тепловой изоляции на нестационарные температурные напряжения в стенках теплосилового оборудования. — Энергомашиностроение, 1972, № 11, с. 39—40.
4. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник.—М.: Атомиздат, 1979.—216 с.
5. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
6. Ярема С. Я., Внуков А. К. К вопросу прочности барабана при пуске и остановке. — Теплоэнергетика, 1957, № 4, с. 33 36.
7. Саульев В. К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. — М.: Физматгиз, 1960.—325 с.
8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. Практическое руководство: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 238 с.
9. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник/ Под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1982.—512 с.
10. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с