

621.181.12.018.52

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБРОСА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЙ КЛАПАН В ПАРОВЫХ КОТЛАХ МАЛОГО ДАВЛЕНИЯ

*Канд. техн. наук, доц. С.А. ВЛАСЕНКО, д-р техн. наук, проф. Ю.Х. ПОЛАНДОВ*

*При некоторых условиях открытие предохранительного клапана у паровых котлов может привести к выбросу горячей воды, что представляет опасность для обслуживающего персонала. Предложен способ расчета массы воды, истекающей из парового котла при срабатывании предохранительного клапана и меры по исключению возникновения этой опасной ситуации.*

*Under some conditions opening of a safety valve at steam boilers can lead to emission of hot water through it, that represents danger to the attendants. The way of calculation of weight of the water expiring from a steam boiler at operation of a safety valve and a measure on exception of this dangerous situation is offered.*

Прежде всего речь идет о паровых котлах малого давления, в которых рабочее давление не превышает 0,07 МПаи (избыточных), что соответствует температуре верхних слоев воды 114 °С. Как известно, при работе парового котла уровень воды в нем повышается против исходного, во-первых, за счет нагрева воды, а, во-вторых, при вскипании благодаря появлению пузырьков пара, которые ее вытесняют. Разработчики паровых котлов знают об этих эффектах, учитывают их, и потому, проектируют размер парового пространства таким образом, чтобы вода, увеличив свой объем, не попала в расходную магистраль пара. Это обстоятельство подтверждено результатами заводских и иных испытаний.

Однако режим, при котором предохранительный клапан срабатывает, не принимается во внимание разработчиками, так как он считается опасным и недопустимым. В то же время, понятно, что срабатывание предохранительного клапана во время эксплуатации котла вполне возможно. Но, если это так, то, учитывая, что при этом расход пара из котла увеличивается, а процесс кипения интенсифицируется, то в определенных условиях объем, занимаемый водой, может превысить размер парового объема и привести к появлению воды в проточной части клапана, с чем связано возникновение следующих негативных обстоятельств:

- пропускная способность предохранительного клапана уменьшается;
- большая часть энергии выбрасывается вместе с нагретой водой;
- возникает опасность появления горячей воды в помещении котельной.

В связи с этим возможность расчета степени увеличения объема воды при срабатывании предохранительного клапана и ее учет на стадии проектирования котла могли бы исключить данные негативные обстоятельства.

Построенная А.А. Авдеевым модель [1] была принята за основу решения задачи о процессе вскипания элементарного слоя нагретой воды выше 100 °С при резком нарушении баланса в системе пар—вода за счет появления расхода пара в самом простейшем случае. Покажем, как можно учесть при этом, во-первых, влияние формы сосуда, во-вторых, разной степени участие горизонтальных слоев воды в парообразовании и, в-третьих, величину расхода пара из котла. Конечно, при расчете должна быть учтена и работа самой топки.

К сожалению, оказалось невозможным принять во внимание известные экспериментальные данные, полученные Б.А. Дементьевым [2] при исследовании поведения системы пар—вода при ее нагреве до температуры выше 200 °С и при резком появлении расхода пара. Связано это с тем, что, во-первых, температура воды при этих исследованиях была существенно выше температуры воды в паровом котле малого давления, во-вторых, градиент температуры по высоте устройства вообще не принимался во внимание. К тому же размеры использованного объема сосуда на экспериментах были сравнительно малы и составляли не более 5% от объема реальных котлов.

В нашей задаче примем, что на котле закрыта расходная магистраль, а котел работает только на разогрев воды и подъем давления пара до значений, при которых срабатывает предохранительный клапан. Как показали эксперименты, проведенные на трех типах паровых котлов малого давления, участие в нестационарных внутрикотловых процессах принимают лишь те слои воды, которые находятся на одном уровне с теплопередающими элементами котла; а слои воды, расположенные ниже, в этом процессе не участвуют. Применительно к котлу ВКВ-300Л (рис. 1) граница слоев воды, в которых идет парообразование, соответствует нижней точке жаровой трубы (точка А). Эту точку и примем за начало системы отсчета координат, а координатную ось  $h$  направим вверх. Выделим в котле на высоте  $h$ , где находится вода, горизонтальный слой толщиной  $dh$ . Выберем в качестве основного показателя паросодержание  $f$ , характеризующее смесь пар—вода как отношение объема, занимаемого паром, ко всему объему, т. е.

$$f = V_{\text{п}}/V,$$

где  $V_{\text{п}}$  — объем, занимаемый паром;  $V$  — объем, занимаемый паром и водой.

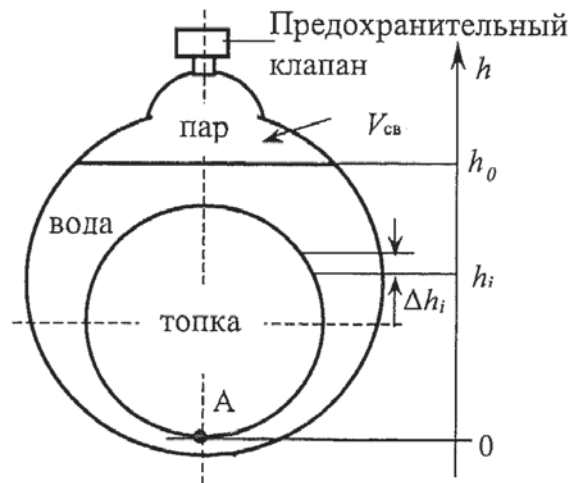


Рис. 1 — Схема типичного котла малого давления в поперечном сечении

Тогда процесс парообразования в бесконечно тонком горизонтальном слое воды толщиной  $\Delta h$  может быть описан уравнениями сохранения массы и энергии следующего вида. Во-первых,

$$\Delta M_{\text{в}} = \rho_1 F (1 - f) \Delta h, \tag{1}$$

где  $\Delta h$  — высота слоя воды;  $F$  — площадь горизонтального сечения водяного объема на высоте  $h$ ;  $f$  — паросодержание;  $\rho_1$  — плотность воды.

Во-вторых, уравнением сохранения энергии для этого же слоя, которое состоит из двух компонент:

$$\Delta E_1 = \Delta E_2 + \Delta E_3, \quad (2)$$

где  $\Delta E_1$  — мощность, подводимая от топки котла;  $\Delta E_2$  — мощность, затрачиваемая на нагрев воды;  $\Delta E_3$  — мощность, затрачиваемая на испарение воды (или ее конденсацию).

Будем считать, что подвод тепла от топки к воде осуществляется равномерно по всей высоте расположения теплопередающих элементов, т. е. каждый малый слой воды обогревается с той же мощностью, что и любой другой. Тогда мощность, подводимая к слою воды  $\Delta h$  за счет работы топки, можно описать выражением

$$\Delta E_1 = \frac{q}{h_0} \Delta h, \quad (3)$$

где  $q$  — тепловая мощность топки;  $h_0$  — вертикальный размер теплопередающих элементов.

Мощность, расходуемая на нагрев воды, можно рассчитать так:

$$\Delta E_2 = F(1-f)\rho_1 c \frac{dT}{dt} \Delta h, \quad (4)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость воды;  $T$  — температура воды;  $t$  — время.

Для получения выражения  $\Delta E_3$  отметим, что значение паросодержания  $f$  изменяется от слоя к слою. Это обусловлено, во-первых, тем, что площадь поперечного сечения котла изменяется по его высоте,  $F = F(h)$ , а происходит ввиду того, что пузырьки пара определенное время находясь в объеме воды, накапливаются в нем по мере их подъема от слоя к слою. В этой связи в слой пароводяной смеси толщиной  $\Delta h$  на высоте  $h$  в единицу времени входит поток пара массой  $\Delta M_{n1}$

$$\frac{dM_{n1}}{dt} = m_{p1} = \rho_2 F' f' w', \quad (5)$$

где  $\rho_2$  — плотность пара (плотность пара примем независимой от глубины залегания слоя воды);  $F'$  — площадь поперечного сечения котла с нижней стороны слоя;  $f'$  — паросодержание с нижней стороны слоя;  $w'$  — скорость подъема паровых пузырей с нижней стороны слоя.

На выходе из рассматриваемого слоя (верхней его части) поток пара приобретает другие значения, что можно описать выражением

$$\frac{dM_{n2}}{dt} = m_{p2} = \rho_2 F'' f'' w'', \quad (6)$$

где  $\Delta M_{n2}$ ,  $F''$ ,  $f''$ ,  $w''$  — масса пара; площадь поперечного сечения котла; паросодержание и скорость подъема паровых пузырей на выходе из слоя соответственно.

Изменение массы пара на участке  $\Delta h$  обусловлено затратами мощности

$$\Delta E_3 = r(m_{n2} - m_{n1}) = r\rho_2 (F'' f'' w'' - F' f' w') = r\rho_2 \Delta (Ffw),$$

где  $r$  — теплота парообразования.

Воспользуемся теоремой Лагранжа, тогда последнее уравнение можем переписать так:

$$\Delta E_3 = r\rho_2 \frac{d(Ffw)}{dh} \Delta h. \quad (7)$$

Проведя дифференцирование и другие преобразования, представим это выражение в виде

$$\begin{aligned} \Delta E_3 &= r\rho_2 \left( Fw \frac{df}{dh} + fw \frac{dF}{dh} + Ff \frac{dw}{dh} \right) \Delta h = r\rho_2 \left( Fw \frac{df}{dh} + fw \frac{dF}{dh} + Ff \frac{dw}{df} \frac{df}{dh} \right) \Delta h = \\ &= r\rho_2 fw \frac{dF}{dh} \Delta h + r\rho_2 \left( Fw + Ff \frac{dw}{df} \right) \frac{df}{dh} \Delta h. \end{aligned} \quad (8)$$

Определив слагаемые в (2), перепишем его

$$\frac{q}{h_0} \Delta h = F(1-f)\rho_1 c \frac{dT}{dt} \Delta h + r\rho_2 fw \frac{dF}{dh} \Delta h + r\rho_2 F \left( w + f \frac{dw}{df} \right) \frac{df}{dh} \Delta h. \quad (9)$$

Разрешим это уравнение относительно производной  $\frac{df}{dh}$

$$\frac{df}{dh} = \frac{-F(1-f)\rho_1 c \frac{dT}{dt} + \frac{q}{h_0} - r\rho_2 fw \frac{dF}{dh}}{r\rho_2 F \left( w + f \frac{dw}{df} \right)}. \quad (10)$$

В этом уравнении, кроме  $f$ , остаются неизвестными  $dT/dt$ ,  $w$  и  $F$ .

Определимся с  $dT/dt$  в элементарном слое. Примем во внимание, что увеличение объема воды за счет вытеснения пузырьками пара не зависит от характера их расположения на горизонтальных площадках. Это обстоятельство позволяет игнорировать факт неравномерности расположения пузырьков, имеющий место из-за их концентрации вблизи теплопередающих элементов и отсутствия их на периферии.

Учтем также и то, что слои воды в паровом котле по разному участвуют в процессе парообразования при нестационарных режимах работы котла, т. е. при изменении давления в котле и перестройке температурного поля, что обнаружено экспериментально [3]: верхние слои оказались более активными, а при  $h \leq 0$  они не участвуют в процессе. Согласно экспериментальным данным с достаточной степенью точности зависимость можно представить пропорционально высоте слоев воды:

$$\Delta T(h) = \Delta T_k h / h_0 \quad \text{или} \quad dT = dT_k (h/h_0). \quad (11)$$

Температура верхних слоев воды и давление пара в котле жестко связаны между собой линией насыщения. В рамках решаемой задачи эту связь можно аппроксимировать простой зависимостью  $T_k = Lp$ , где  $p$  — давление в котле. Тогда

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h}{h_0} \frac{dT_k}{dt} = \frac{h}{h_0} \frac{dT_k}{dp} \frac{dp}{dt} = \frac{h}{h_0} \frac{dT_k}{dp} \frac{dp}{dt} = \frac{h}{h_0} L \frac{dp}{dt}. \quad (12)$$

Свяжем теперь изменение давления в котле  $dp/dt$  с расходом пара через предохранительный клапан. Во-первых, с достаточной точностью для давлений, при которых срабатывает предохранительный клапан котла малого давления, можно рассчитать расход пара через него с помощью известного соотношения

$$m_u = \mu F_k \frac{p}{B}, \quad (13)$$

где  $m_n$  — расход пара через клапан;  $\mu$  — коэффициент расхода предохранительного клапана;  $F_k$  — площадь сечения входного патрубка предохранительного клапана;  $B$  — коэффициент, характеризующий свойства истекающего пара.

Учтем, что расход пара из котла равен количеству образующегося в единицу времени пара  $m_n$ , т. е.  $m_n = m_n$ . Значения  $m_n$  можно определить, интегрируя парообразование по каждому слою воды,

$$m_n = -\frac{d}{dt} \int_0^{h_p} \frac{c\rho_1}{r} F \Delta T(h) dh. \quad (14)$$

Или с учетом (11) и того, что переменные по  $h$  и по  $t$  независимы,

$$m_n = -\frac{c\rho_1}{r} \frac{dT_k}{dt} \int_0^{h_p} F \frac{h}{h_0} dh = -\frac{c\rho_1}{h_0 r} \frac{dp}{dt} L \int_0^{h_p} F h dh, \quad (15)$$

где  $h_p$  — уровень воды. Знак минус в (14) характеризует затраты энергии на испарение воды.

Приравняв выражения (13) и (15), получим

$$\frac{\mu p F_k}{B} = -\frac{c\rho_1}{h_0 r} \frac{dp}{dt} L \int_0^{h_p} F h dh. \quad (16)$$

Решение задачи можно существенно упростить, если принять во внимание, что нас интересует только начальный момент истечения через предохранительный клапан (в первые секунды), так как именно этот момент определяет попадание воды в проточную часть клапана. Тогда можно принять  $B = \text{const}$  и  $p = \text{const} = p_0$ , после чего получим

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p_0 F_k r \mu h_0}{L c \rho_1 B \int_0^{h_p} F h dh} \quad \text{или} \quad \frac{dT}{dt} = -\frac{p_0 F_k r \mu}{c \rho_1 B \int_0^{h_p} F h dh} h. \quad (17)$$

Влияние скорости подъема паровых пузырей на значение паросодержания определим, учитывая тот факт, что скорость пузырей является функцией от паросодержания. Аппроксимируя известные экспериментальные данные [1, 4], можно получить выражение, приблизительно отражающее данную зависимость

$$w = \alpha + \beta f, \quad \text{а} \quad \frac{dw}{df} = \beta, \quad (18)$$

где  $\alpha = 1,05$  и  $\beta = 1$ .

Подставляя в (10) выражения (17), (18), получим

$$\frac{df}{dh} = \frac{(1-f)p_0 F_k \mu h}{(\alpha + 2\beta f) \rho_2 B \int_0^{h_p} F(h) h dh} + \frac{q}{(\alpha + 2\beta f) h_0 r \rho_2 F(h)} - \frac{f}{F(h)} \frac{\alpha + \beta f}{\alpha + 2\beta f} \frac{dF}{dh}, \quad (19)$$

Уравнение (19) можно решить численным способом при известных  $q$ ,  $h_0$ ,  $F = F(h)$ ,  $\mu$ ,  $F_k$  и  $p_0$  (для котлов малого давления  $p_0 = 0,17$  МПа)

$$\Delta f_i = \frac{(1-f_i)p_0 F_k \mu h_i}{(\alpha + \beta f_i) \rho_2 B L} \Delta h + \frac{q}{(\alpha + \beta f_i) h_0 r \rho_2 F(h_i)} \Delta h - \frac{f_i}{F(h_i)} \frac{\alpha + \beta f}{\alpha + 2\beta f} \Delta F(h_i), \quad (20)$$

$$\text{где } I = \int_0^{h_p} F h dh = \sum_{h=0}^{h_p} F_i h_i \Delta h_i.$$

Расчет начинают со значений  $h_i = 0$ ,  $f_i = 0$  и  $p_0 = 0,07$  (МПа).

Изменение паросодержания между двумя соседними сечениями запишем так:

$$f_i = f_{i-1} + \Delta f_i. \quad (21)$$

Используя полученные значения  $f_i$ , можно найти приращение объема вспененной воды в котле в начальный момент срабатывания клапана

$$V_n = \Delta h \sum_{i=0}^n f_i F_i. \quad (22)$$

Масса воды  $M_n$ , выброшенной через предохранительный клапан, определяется разностью между приращением объема воды  $V_n$  и свободным объемом парового пространства  $V_{св}$ ,

$$M_n = (V_n - V_{св})(1 - f). \quad (23)$$

Отметим, что при расчете по (23) необходимо принимать во внимание значения, полученные при положительной разности  $(V_n - V_{св})$ . В противном случае значения  $M_n$  необходимо приравнять к нулю, поскольку выброса смеси через клапан не происходит.

К исключению выброса горячей воды из котла через предохранительный клапан приводит увеличение размеров свободного парового объема и уменьшение пропускной способности предохранительного клапана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев А. А., Авдеева А. А. Кипение жидкости при сбросе давления // Теплоэнергетика. — 1980. — № 8. — С.83—85.
2. Деметьев Б. А., Скотников А. П. Экспериментальное исследование гидродинамических процессов при разгерметизации сосудов // Теплоэнергетика. — 1979. — №10. — С.65—67.
3. Тепло - и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева. — М.: Энергоиздат, 1982. — 512 с.