

УДК 614.84

*Е.А. Петухова, канд. техн. наук, доцент, НУГЗУ,
В.М. Халыпа, канд. техн. наук, доцент, НУГЗУ,
В.А. Метелев, магистрант, НТУ «ХПИ»*

ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОПРОВОДА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

(представлено д-ром техн. наук Лариным А.Н.)

Предложена методика расчёта напряжённо-деформированного состояния тонкой цилиндрической трубы при гидравлическом ударе в момент включения и выключения пожарных насосов.

Ключевые слова: противопожарный водопровод, гидравлический удар, осесимметричная деформация, давление, окружные напряжения и напряжения изгиба.

Постановка проблемы. Система противопожарного водоснабжения – комплекс инженерных сооружений, основным элементом которого является водопроводные сети, работающие в двух режимах – до пожара (обеспечивают пропуск воды на хозяйственно – питьевые, производственные нужды соответствующих водопотребителей) и при пожаре (обеспечивают дополнительную подачу воды на нужды пожаротушения). Подача дополнительных пожарных расходов воды осуществляется пожарными насосами, установленными в насосных станциях, которые включаются в работу при поступлении сигнала о возникновении пожара. Сооружения, сохраняющие запас воды для первых минут тушения пожара, обеспечивают возможность плавного изменения нагрузки в водопроводных сетях в момент включения пожарных насосов и мгновенного отключения электродвигателей. Но при внезапной остановке насоса в трубопроводе возникает гидравлический удар, который может привести к нарушению нормальной работы трубопровода и даже к разрушению трубы, что негативно скажется на возможности обеспечения подачи воды на пожаротушение [1].

Происходящее при гидравлическом ударе резкое повышение давления ΔP представляет собой весьма опасное явление, поэтому разработаны практические меры борьбы с ним. Существуют конструктивные способы уменьшения ΔP , например установка гидроаккумуляторов или диафрагм, разрушающихся при повышении давления и сбрасывающих жидкость в компенсатор. Однако в последнее время проектировщики предпочитают увеличение прочности трубы, что приводит к необходимости построения расчетных схем, учитывающих все особенности процесса деформирования трубы при гидравлическом ударе.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие методы расчета труб на прочность и жесткость базируются на безмоментной теории деформирования тонких цилиндрических оболочек под действием постоянного давления, равного сумме P – эксплуатационного и ΔP – ударного давлений [2-3]. В такой постановке растягивающие окружные напряжения σ_θ постоянны во всех осевых сечениях трубы, и в этом случае коэффициент запаса прочности n относительно допускаемого напряжения $[\sigma]$ составляет $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_\theta}$.

На самом деле во время гидравлического удара одна часть трубы находится под давлением P , а другая под давлением $P + \Delta P$. В предлагаемой работе излагается методика расчета напряженно-деформированного состояния той части трубы, которая находится в окрестности скачкообразного изменения давления.

Постановка задачи и ее решение. Для обеспечения прочности противопожарного трубопровода при воздействии гидравлического удара необходимо рассчитать напряженно-деформированное состояние трубы в зоне скачкообразного повышения давления. Обоснование явления гидравлического удара в трубах и метод его расчета были предложены проф. Н.Е. Жуковским. Его имя в частности носит формула для определения избыточного ΔP ударного давления:

$$\Delta P = \rho V a, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³, V – средняя скорость жидкости, перекачиваемой по трубе, м/с; a – скорость распространения ударной волны, м/с, которая определяется:

$$a = \sqrt{\frac{E_g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_g}{E_T} \cdot \frac{d}{h}}}, \quad (2)$$

где E_g – модуль упругости жидкости, Па; E_T – модуль упругости материала трубы, Па; $\frac{d}{h}$ – отношение внутреннего диаметра трубы к толщине ее стенки.

Для исследования осесимметричной деформации изгиба трубы, которая независимо от величины эксплуатационного давления определяется только величиной ΔP , рассмотрим расчетную схему рис. 1.

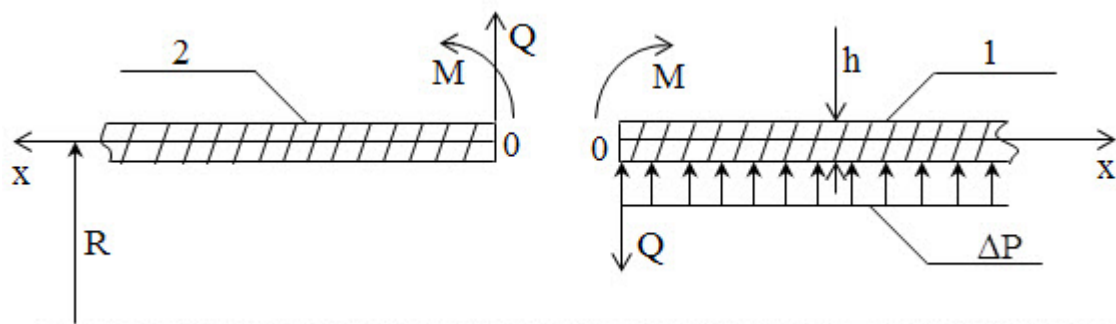


Рис. 1– Расчётная схема изгиба трубы в зоне резкого повышения давления

Разделим трубу на две части: первая в рассматриваемый момент уже подвержена ΔP , вторая еще нет, и для каждой из частей введем свою локальную систему координат OX .

Обе части трубы далее рассматриваются как длинные тонкие цилиндрические оболочки постоянной толщины h , радиусом средней поверхности R и коэффициентом Пуассона материала трубы – μ . Неизвестными краевыми распределенными нагрузками Q – поперечной силой и M – изгибающим моментом заменим силовое воздействие одной части трубы на другую. Эти неизвестные определим из геометрических условий сопряжения обеих частей труб при $x = 0$:

$$W_1 = W_2; \varphi_1 = \varphi_2, \quad (3)$$

где W_1 и W_2 – радиальные перемещения, φ_1 и φ_2 – углы поворота частей труб под действием всех нагрузок.

Формулы для определения этих величин представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} W_1 = -\frac{Q}{2\beta^3 D} + \frac{M}{2\beta^2 D} + \frac{\Delta P R^2}{E_T h}; W_2 = -\frac{Q}{2\beta^3 D} + \frac{M}{2\beta^2 D}; \\ \varphi_1 = \frac{Q}{2\beta^2 D} - \frac{M}{\beta D}; \varphi_2 = \frac{Q}{2\beta^2 D} + \frac{M}{\beta D}. \end{cases} \quad (4)$$

где $D = \frac{E_T h^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость оболочки

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2}}.$$

Подставляя (4) в (3) находим $M = 0$, $Q = \frac{\Delta P R^2 \beta^3 D}{E_T h}$.

Поскольку в трубе, кроме ΔP , действует постоянное эксплуатационное давление P , которое создает постоянное по всей длине трубы радиальное перемещение ее стенок, равное $\frac{PR^2}{E_T h}$, то окончательный вид функции распределения радиальных перемещений в обеих частях трубы запишется так:

$$W_1 = \frac{R^2}{E_T h} \left[\Delta P \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x \right) + P \right]; W_2 = \frac{R^2}{E_T h} \left(\frac{\Delta P}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x + P \right). \quad (5)$$

Осевой изгибающий момент M_1 , действующий в первой части трубы определяется выражением:

$$M_1 = D \frac{d^2 W_1}{dx^2} = \frac{\Delta P R^2 h^2 \beta^2}{6(1-\mu^2)} e^{-\beta x} \sin \beta x. \quad (6)$$

Исследуя эту функцию на экстремум находим, что своего наибольшего по модулю значения изгибающий момент достигает при $x = \frac{\pi}{4\beta}$ и равен:

$$M_{1\max} = \frac{\sqrt{2} \Delta P R^2 h^2 \beta^2}{12(1-\mu^2)} e^{-\frac{\pi}{4}} \quad (7)$$

Соответствующий момент M_2 , действующий во второй части трубы отличается от M_1 только знаком $M_2 = -M_1$.

При плоском напряжённом состоянии прочность трубы оценивается с помощью главных напряжений σ_θ - действующих в окружном направлении и σ_x - в осевом направлении в сечении трубы, где действует максимальный изгибающий момент $M_{1\max}$. Эти напряжения определяются по следующим формулам:

$$\sigma_\theta = \frac{(P + \Delta P)R}{h} \pm \frac{6\mu M_{1\max}}{h^2}; \sigma_x = \pm \frac{6M_{1\max}}{h^2}. \quad (8)$$

Для обеспечения прочности с коэффициентом запаса n относительно предела текучести σ_T необходимо при проектировании выполнить условие:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 \leq \left[\frac{\sigma_T}{n} \right]^2. \quad (9)$$

Выводы. Предложена методика расчёта напряжённно-деформированного состояния трубы в зоне скачкообразного повышения давления, вызванного гидравлическим ударом при включении и выключении пожарных насосов. Она позволяет учитывать деформации и напряжения в осевом направлении, указаны сечения, в которых изгибающий момент достигает своего наибольшего значения, что даёт возможность обеспечить прочность на этапе проектирования трубопровода при гидравлическом ударе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антіпов І.А. Протипожежне водопостачання: [підручник] / Антіпов І.А., Кулешов М.М., Петухова О.А. – Харків : АЦЗУ, 2004. – 255 с.
2. Тимошенко С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М : Наука, 1966. - 636 с.
3. Шутенко Л. М. Механіка споруд / Л. М. Шутенко, В. П. Пустовойтов, М. А. Засядько. — Харьков : ХДАМГ, 2001. – 239 с.
nuczu.edu.ua

О.А. Петухова, В.М. Халипа, В.О. Метельов

Осесиметрична деформація циліндричної труби протипожежного водопроводу при гідравлічному ударі

Запропонована методика розрахунку напружено-деформованого стану тонкої циліндричної труби при гідравлічному ударі у момент включення і виключення пожежних насосів.

Ключові слова: протипожежний водопровід, гідравлічний удар, осесиметрична деформація, тиск, окружні напруження і напруження згину.

O.A. Petuhova, V.M. Chalypa, V.O. Mielielov

Axisymmetric deformation of the cylindrical pipe from hydraulic hammer in a fire-prevention water supply

The method of calculation the stress-strain state of a thin cylindrical pipe with water hammer at the moment of switching on and off fire pumps is offered.

Keywords: fire-prevention water supply, water hammer, axisymmetric strain, pressure, circumferential stress and bending stress.