

предприятий: Справочное издание / В. И. Аксенов [и др.]. – М.: Теплотехник, 2007. – Кн. 4. – 240 с.

10. Аксенов В. И. Замкнутые системы водного хозяйства металлургических предприятий. – М.: Металлургия, 1983. – 88 с.

11. Аксенов В. И., Балакирев В. Ф., Филиппенков А. А. Проблемы водного хозяйства металлургических, машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 267 с.

12. Мишустин Е. Н., Перцовская М. И., Горбов В. А. Санитарная микробиология почвы. – М.: Наука, 1979. – 304 с.

13. Кутепов Л. Е. Состояние вопроса почвенной очистки СВ // Почвоведение.

– 1968. – № 11. – С. 57–69.

Материал поступил в редакцию 23.10.13.

Гостищев Дмитрий Петрович, доктор технических наук

Тел. 8-916-279-46-65

E-mail: gostishchev46@mail.ru

Широкова Вера Александровна, доктор географических наук

Тел. 8-916-917-81-97

E-mail: shirocova@gmail.com

Хуторова Алла Олеговна, кандидат географических наук

Тел. 8-926-560-40-04

E-mail: hutorova alla@mail.ru

Аксёнов Валентин Иванович, кандидат технических наук

Ничкова Ирина Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук

УДК 502/504:628.12:001.5

Д. С. БЕГЛЯРОВ, Д. Т. БАУТДИНОВ, А. И. ПОПОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

Д. М. ГРЕКОВ

ОАО «Институт Гидропроект», Москва

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Приведены результаты исследований переходных процессов и напряжений на напорный трубопровод. В качестве средства для снижения давления в напорных трубопроводах применяется стабилизатор давления.

Напорные системы, переходные процессы, пульсация давления, гидравлический удар, стабилизатор давления.

There are given investigation results transients study and stresses on the pressure pipeline. As a means for pressure reduction in pressure pipelines a pressure stabilizer is used.

Pressure systems, transients, pressure pulsation, hydraulic impact, pressure stabilizer.

Большая степень износа трубопроводов и оборудования, недостаточный уровень технической оснащённости трубопроводных систем приводят к повышенной аварийности и значительным затратам на ремонт. В этих условиях все большее внимание уделяется поиску путей и принятию мер с целью повыше-

ния безопасности объектов трубопроводной инфраструктуры. Для нормальной работы гидросистем в штатном режиме (расчетном давлении) определяют прочностные показатели труб и оборудования. Такие показатели рассчитывают на максимальное рабочее давление с учетом его значений при переходных, нештатных

(аварийных) режимах работы гидросистемы, когда величины резких колебаний давления (гидравлических ударов) могут значительно превышать максимальную величину колебаний давления в штатном режиме работы [1].

Непременным условием обеспечения противоаварийной защиты трубопроводных систем от гидравлических ударов в нештатных (аварийных) режимах работы гидросистемы является проведение мероприятий по предупреждению недопустимого повышения давления, в частности создание эффективных средств борьбы и правильное их использование.

Среди применяемых в настоящее время средств защиты от гидроударов наиболее современными по обеспечению безаварийной и надежной работы напорных трубопроводов насосных станций являются стабилизаторы давления «ЭКОВЭЙВ», один из типового ряда которых представлен на рис. 1.



Рис. 1. Стабилизатор давления «ЭКОВЭЙВ» СДТ 16-150

Результаты анализа аварийности на объектах подтвердили вывод, что при оценке надежности напорных систем водоподдачи необходимо рассматривать отдельные элементы – насосные станции, напорные трубопроводы, а также систему в целом, поскольку в системах, состоящих из взаимосвязанных элементов, опасность возникновения нежелательных последствий при выходе из строя даже одного элемента становится реальной [2].

Для детального изучения возникающих в гидросистеме процессов и их последствий, а также для повышения

эффективности применения средств противоаварийной защиты были проведены исследования переходных процессов на станции Троице-Лыково «Сосновка-4» с установленным стабилизатором давления «ЭКОВЭЙВ» СДТ 16-150 (см. рис. 1) [3].

Исследуемая система оборудована двумя сетевыми насосами типа ВЛ 80/170-30/2, из которых в рабочем состоянии находится один насос. Давление в напорном коллекторе 0,45...0,55 МПа.

Из экспериментальных данных следует, что на стационарных режимах работы насосов в системах водоснабжения происходят интенсивные высокочастотные колебания давления, вызывающие повышенные нагрузки на трубопроводы, ускорение коррозионных процессов и, как следствие, прорывы ослабленных и изношенных участков трубопроводов. Амплитуда рабочего давления при переходных режимах может достигать 1,3 МПа. С учетом изношенности трубопроводов это также может привести к их прорывам.

С целью получения числовых значений высокочастотных колебаний давления был установлен допустимый уровень динамических нагрузок на трубопроводы и оборудование.

Для определения напряжений в стенках трубопровода будем полагать, что помимо постоянного давления p_n (примем до 0,7 МПа) на него действуют переменные во времени нагрузки – пульсация давления, гидроудары и вибрация. Радиальные и осевые напряжения от динамической составляющей давления могут быть определены по следующим формулам:

$$p_0 = \sigma_{\Delta pm} = \frac{\Delta p \cdot D}{\delta};$$

$$p_{\Delta} = \sigma_{\Delta pt} = \frac{\Delta p \cdot D}{2\delta},$$

где Δp – амплитуда колебаний давления; D – диаметр трубопровода; δ – толщина стенки ($\delta = 6$ мм)

Максимальное напряжение, вызванное вибрацией трубопровода, можно определить, используя следующую зависимость:

$$\sigma_v = v_{\text{emax}} \cdot \sqrt{c_b E \rho},$$

где v_{emax} – максимальное значение виброскорости; E – модуль упругости; ρ – удельная масса трубопровода (масса единицы объема трубопровода); c_b – коэффициент, учитывающий распределение амплитуд виброскорости по трубопроводу (для прямолинейного трубопровода $c_b = 3$).

Суммарное напряжение в осевом направлении от действия пульсаций давления и вибрации:

$$\sigma_t = \sigma_{\Delta p t} + \sigma_v = \frac{\Delta p D}{2\delta} + v_{e\max} \cdot \sqrt{c_b E \rho}.$$

Таким образом, трубопровод находится в сложном напряженном состоянии, характеризующимся действием циклического изгиба от вибрации и растяжением стенки трубопровода от пульсаций давления. На рис. 2 представлена схема, где показаны нагрузки и воздействия на оболочку трубопровода.

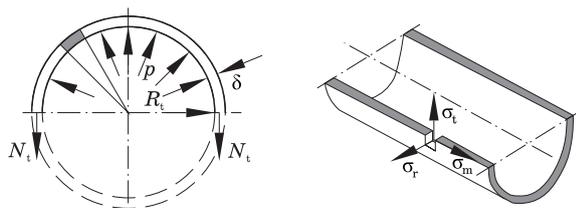


Рис. 2. Расчетная схема оболочки трубопровода

При двухосном напряженном состоянии запас усталостной прочности трубопровода можно определить по формуле, которая применима и в случаях синфазного изменения σ_t и σ_{mp} [4]:

$$n = \frac{n_m \cdot n_t}{\sqrt{(n_m)^2 + (n_t)^2}},$$

где n – запас усталостной прочности трубопровода; n_m – запас усталостной прочности в предположении, что напряжения σ_t отсутствуют; n_t – запас усталостной прочности в предположении отсутствия напряжений σ_{mp} .

Практикой установлено, что если элемент той или иной конструкции многократно подвергать переменному нагружению, то после определенного числа перемен напряжений в нем появится трещина, которая постепенно будет развиваться.

Усталостное разрушение наблюдается при многократном повторении нагрузки, периодически изменяющейся не только по величине, но и по знаку, когда на выносливость материала одновременно оказывают влияние и повторность, и переменность нагружения.

При рассмотрении сопротивления материалов действию переменных напряжений в большинстве случаев инженерной практики предполагается, что эти напряжения представляют собой периодические функции времени с периодом

T . Совокупность всех значений напряжений за время одного периода называется циклом напряжений (рис. 3).

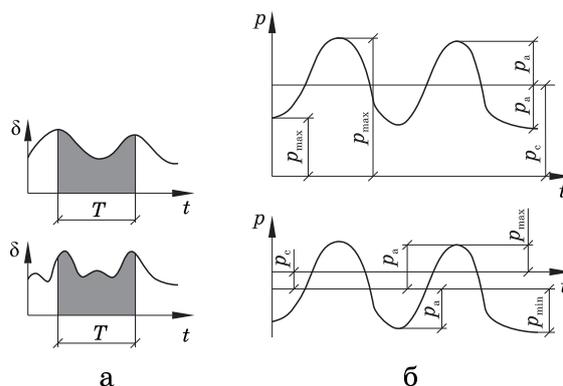


Рис. 3. Совокупность всех значений напряжений за время одного периода (цикл напряжений) – а; постоянное или среднее напряжение цикла p_c – б

Отношение минимального напряжения цикла к максимальному с учетом знаков этих напряжений называется коэффициентом асимметрии цикла. Наиболее опасным является так называемый симметричный цикл, когда $p_{\max} = -p_{\min}$.

Коэффициенты асимметрии цикла:

$$r_m = \frac{\sigma_{\min}^m}{\sigma_{\max}^m} = \frac{\frac{p_p D}{\delta} - \frac{\Delta p D}{\delta}}{\frac{p_p D}{\delta} + \frac{\Delta p D}{\delta}} = \frac{p_p - \Delta p}{p_p + \Delta p};$$

$$r_t = \frac{\sigma_{t\min}}{\sigma_{t\max}} = \frac{\frac{p_p D}{2\delta} - \sigma_t}{\frac{p_p D}{2\delta} + \sigma_t}.$$

Допускаемые амплитуды напряжений в стенке трубопровода можно вычислить по формулам:

$$\sigma_{\Delta m} = \frac{\sigma_{-1} \beta \cdot k}{n_m \left(1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r_m}{1-r_m}\right)};$$

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{\sigma_{-1} \beta \cdot k}{n_t \left(1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \frac{1+r_t}{1-r_t}\right)},$$

где σ_B – предел прочности; σ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле нагружения; β – коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности трубопровода на предел выносливости (для новых трубопроводов $\beta = 0,8...0,85$, а для подверженных коррозии может уменьшаться до величины $\beta = 0,5$); $k = 1/k_k$; k_k – коэффициент концентраций напряжений.

Следует отметить, что на предел выносливости трубопровода при циклическом нагружении в значительной мере оказывает влияние предыстория изготовления труб, или «технологическая наследственность». Результаты расчетов показывают, что при формировании прямошовных электросварных труб это может

привести к созданию в материале трубы на расстоянии до 150...170 мм от шва остаточных напряжений до 80...100 МПа, что резко уменьшает предел усталостной прочности трубопровода. Поэтому при определении допустимых динамических нагрузок на трубопровод необходимо учитывать и этот фактор (таблица).

Динамические нагрузки на напорный трубопровод

Объект	Динамическая нагрузка			
	Действующая $\sigma_{\Delta P_m}$, МПа	Допустимая $\sigma_{\Delta P_m}$, МПа	Действующая $\sigma_{\Delta P_t}$, МПа	Допустимая $\sigma_{\Delta P_t}$, МПа
Напорный трубопровод	14,6	6,74	7,98	6,98

Величину σ_{-1} можно определить, используя справочные данные либо по формуле Мэнсона:

$$\sigma_{-1} = 1,75 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{N^{0,12}} \right),$$

где N – число циклов нагружения.

Для материала трубопровода Ст20 в соответствии с [4]: $\sigma_{-1} = 120...160$ МПа, $\sigma_b = 420$ МПа, $\sigma_T = 220$ МПа.

Запас усталостной прочности трубопровода должен быть не менее $n = 2,0$. Полагая, что $n_m = n_t$, определим:

$$n_m = n_t = \sqrt{2 \cdot n} = 2,83.$$

По результатам расчета следует, что действующие динамические нагрузки на трубопроводы во время аварийного отключения электропитания превышают допустимые с точки зрения усталостной прочности в радиальном направлении в 1,9–2,3 раза, в осевом – в 1,15–1,2 раза.

Практический опыт эксплуатации стабилизаторов давления показывает следующее: для снижения динамических нагрузок как в радиальном, так и в осевом направлениях достаточно уменьшить величину пульсаций давления в 1,5–2 раза.

Выводы

Полученные в результате проведенных гидравлических испытаний данные позволили провести математические расчеты, разработать конструктивные требования к запасу надежности демпфирующих элементов, определить диаметр, форму и расположение отверстий перфорации с целью обеспечения требуемой эффективности работы стабилизатора давления по гашению гидроудара и вредных пульсаций давления транспортируемой среды.

Установка стабилизаторов давления «ЭЖОВЭЙВ» обеспечила защиту трубопроводной системы от прорывов, вызываемых волновыми колебаниями давления и гидроударами, возникающими вследствие работы штатного насосного оборудования и запорной арматуры в ходе повседневной эксплуатации и при возникновении аварийных ситуаций.

1. Аршеневский Н. Н., Поспелов Б. Б. Переходные процессы в крупных насосных станциях. – М.: Энергия, 1980. – 111 с.

2. Роскин А. Б. Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 02 (42).

3. Ганиев Р. Ф., Низамов Х. Н., Дербуков Е. И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – 260 с.

4. Писаренко Г. С., Агарев В. А. Сопротивление материалов. – Киев: Издательское объединение «Вища Школа», 1973 – 672 с.

Материал поступил в редакцию 21.05.13.

Бегляров Давид Суренович, доктор технических наук, профессор

Тел. 8 (499) 976-11-85

Баутдинов Дамир Тахирович, кандидат технических наук

Тел. 8 (499) 976-33-44

E-mail: damir.tt1@mail.ru

Греков Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, инженер

Тел. 8 (499) 976-11-85

Попов Артем Игоревич, студент