

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОУДАРА В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С КОЛЬЦЕВЫМ ДЕМПФЕРОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

В. С. ДРОБЯЗКО, Г. И. КОНТАРЕВ, В. А. МАХИН

(Днепропетровск)

Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования процесса гидроудара в трубопроводе с кольцевым демпфером пластических деформаций. Кольцевой демпфер пластических деформаций разового действия предназначен для гашения давления гидроудара за счет рассеивания энергии ударной волны на пластическое деформирование внутренней стенки демпфера и эффекта заполнения полости демпфера.

Обозначения

x — линейная координата;	V — объем участка трубопровода;
t — время;	φ, ψ — волновые функции;
v — скорость движения жидкости в трубопроводе;	σ — окружное напряжение в оболочке демпфера;
p — давление жидкости;	ϵ — окружная относительная деформация;
ρ — плотность жидкости;	$\dot{\epsilon}$ — скорость относительной деформации;
a — скорость распространения ударной волны;	E — модуль упругости;
R — радиус стенки демпфера;	ρ_0 — плотность материала стенки демпфера.
δ — толщина стенки трубопровода;	
l — длина участка трубопровода;	
F — площадь поперечного сечения трубопровода;	

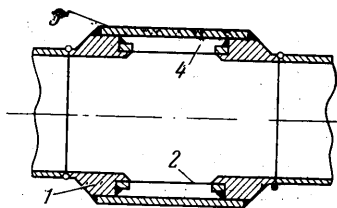
Индексы

0 — начальное значение;	f — жидкость;
1 — входной трубопровод;	δ — демпфер;
2 — выходной трубопровод;	$i = 1, 2, 3 \dots$, номер интервала времени.

$$\frac{1}{R_0} \frac{dR(t)}{dt}$$

1. Описание конструкции демпфера. В гидравлических системах, во многих отраслях техники, имеют место импульсные повышения давления, называемые гидроударом. Во избежание разрушения элементов гидравлических магистралей применяются различные демпферы для гашения давлений гидроудара. Здесь рассматривается кольцевой демпфер пластических деформаций разового действия, предназначенный для гашения давления гидроудара за счет рассеивания энергии ударной волны на пластическое деформирование внутренней стенки демпфера и эффекта заполнения полости демпфера.

Конструктивная схема демпфера приведена на фиг. 1. Кольцевой демпфер пластических деформаций представляет собой участок трубопровода с двойной стенкой и состоит из следующих конструктивных элементов: 1 — корпус, 2 — внутренняя



Фиг. 1

стенка, 3 — наружная стенка, 4 — рабочая полость демпфера. Наружная стенка демпфера является несущим элементом конструкции, а внутренняя стенка — демпфирующим элементом демпфера. Толщина внутренней стенки выбирается, исходя из начального рабочего давления. Для трубопроводов, работающих кратковременно, запас по пределу текучести материала внутренней стенки принимается равным $n_s = 1.05 - 1.10$ по отношению к установившемуся рабочему давлению в трубопроводе. Для проверки герметичности демпфера на его наружной стенке приварен штуцер, который затем заваривается или заглушивается.

Опытная конструкция демпфера была изготовлена для рабочего давления $P = 30 \text{ ат}$ с толщиной внутренней стенки $\delta = 0.35 \text{ мм}$. Внутренняя стенка изготавливается из пластичной стали с остаточным удлинением при разрушении образца $\epsilon \geq 35\%$.

2. Методика расчета гидроудара в гидравлической системе с кольцевым демпфером пластических деформаций. Расчетная схема представлена на фиг. 2 в виде трубопровода с кольцевым демпфером пластических деформаций (2), регулирующим органом (1) и насосом (3). В качестве регулирующего органа использован пироклапан с временем срабатывания $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-3}$ сек.

Пренебрегая путевыми потерями, волновые уравнения для простого трубопровода можно записать в виде [1, 2]

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{a^2 \rho} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.1)$$

Начало осей координат располагается у регулирующего органа или демпфера, положительное направление оси X — против движения жидкости.

Граничные условия для выходного трубопровода запишутся в виде:

$$\begin{aligned} x = 0 \quad v(0, t) &= v_2 \\ x = l \quad p(l, t) &= p_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

т. е. принимается, что задан закон изменения скорости жидкости на входе в демпфер, и на конце выходного трубопровода имеется бесконечная емкость.

Рассматривая демпфер, как сосредоточенный параметр, уравнение неразрывности для демпфера запишется в виде:

$$\frac{dV_\delta}{dt} = -v_1 F_1 + v_2 F_2, \quad \frac{dV_\delta}{dt} = 2\pi R(t) \frac{dR(t)}{dt} l_\delta \quad (2.3)$$

Для определения зависимости между давлением и радиусом срединной поверхности внутренней оболочки демпфера используется уравнение равновесия для внутренней оболочки демпфера (моментные нагрузки не учитываются)

$$\delta \rho R(t) \frac{d^2 R(t)}{dt^2} + \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) \delta_0 - p_\delta(t) R(t) = 0 \quad (2.4)$$

Здесь $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ — задается в виде семейства кривых (см. фиг. 3 — зависимость напряжений σ от относительной деформации ϵ и скорости относительной деформации $\dot{\epsilon}$ для материала внутренней стенки демпфера).

При решении задачи использовано допущение, что осевые деформации во внутренней оболочке демпфера отсутствуют и, следовательно,

$$R(t) \delta = R_0 \delta_0 \quad (2.5)$$

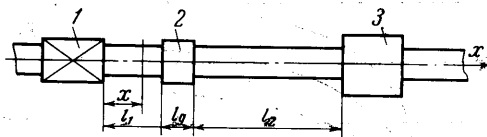
Решение уравнений (2.1) с учетом второго граничного условия запишем в виде [1, 2].

$$\begin{aligned} p(x, t) - p(x, 0) &= a\rho \left[\varphi(x - at) - \varphi\left(x, t - \frac{2(l-x)}{a}\right) \right] \\ v(x, t) - v(x, 0) &= -\varphi(x - at) - \varphi\left(x, t - \frac{2(l-x)}{a}\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Давление в демпфере $p_\delta(t)$ выразим через $R(t)$ и известные функции от t , используя уравнения неразрывности (2.3), волновые уравнения (2.6) и первое граничное условие.

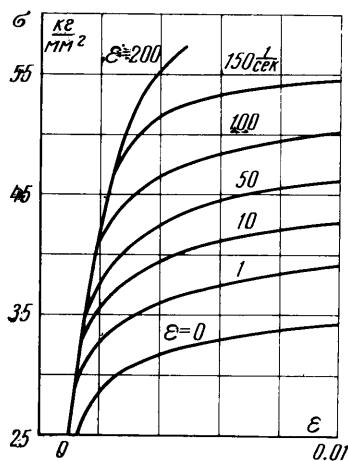
$$p_\delta(t) = A(t) - \frac{2\pi R(t)}{F_2} a_2 \rho l_\delta \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.7)$$

$$A(t) = a_2 \rho \left\{ v_{20} + \frac{p_{20}}{a_2 \rho} - 2\varphi_2 \left[0 - a_2 \left(t - \frac{2l_2}{a_2} \right) \right] - v_1(t) \frac{F_1}{F_2} \right\}$$



Фиг. 2

Подставляя $p_\theta(t)$ в уравнение (2.4), получим систему разрешающих уравнений



Фиг. 3

$$\begin{aligned} \rho_\theta R_0 \delta_0 \frac{d^2 R(t)}{dt} + \delta_0 \sigma(\varepsilon, \varepsilon') + BR^2(t) \frac{dR(t)}{dt} - \\ - AR(t) = 0 \\ p_\theta(t) = A(t) - 2\pi \frac{R(t)}{F_2} l_\theta a_2 \rho \frac{dR(t)}{dt} \\ B = \frac{2\pi l_\theta a_2 \rho}{F_2} \\ A(t) = a_2 \rho \left\{ v_{20} - \frac{p_{20}}{a_2 \rho} - \right. \\ \left. - 2\varphi_2 \left[0 - a_2 \left(t - \frac{2l_2}{a_2} \right) \right] - v(t) \frac{F_1}{F_2} \right\} \\ \varphi_2(0, t) = \frac{p_\theta(t) - p_{20}}{a_2 \rho} + \varphi_2 \left[0 - a_2 \left(t - \frac{2l_2}{a_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Записывая уравнения (2.8) в конечных разностях [3] и, выделяя ΔR_{i+1} , находим

$$\begin{aligned} \Delta R_{i+1} = \frac{A_{i+1} R_i - \delta_0 \sigma_i + \Delta R_i \left[\frac{\rho_\theta R_0 \delta_0}{\Delta t_{i+1} \Delta t_i} + \frac{\delta_0 K_i}{\Delta t_i R_0} \right]}{\frac{\rho_\theta R_0 \delta_0}{\Delta t_{i+1}^2} + \frac{\delta_0 E_i^1}{R_0 \Delta t_{i+1}} + \frac{K_i}{R_0 \Delta t_{i+1}} + \frac{BR_i^2}{\Delta t_{i+1}} - A_{i+1}} \\ \Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i, \quad \Delta R_{i+1} = R_{i+1} - R_i \\ p_{\theta(t_{i+1})} = A_{i+1} - BR_{i+1} \frac{\Delta R_{i+1}}{\Delta t_{i+1}}, \quad E_i^1 = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Big|_{\varepsilon' = \text{const}} \\ A_{i+1} = a_2 \rho \left[v_{20} + \frac{p_{20}}{a_2 \rho} - 2\varphi_2(t_{i+1}) \left(0, t_{i+1} - \frac{2l_2}{a_2} \right) - v(t_{i+1}) \frac{F_1}{F_2} \right] \\ \varphi_2(t_{i+1}) = \frac{p_{\theta(t_{i+1})} - p_{20}}{a_2 \rho} + \varphi_2 \left(0, t_{i+1} - \frac{2l_2}{a_2} \right), \quad K_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Big|_{\varepsilon' = \text{const}} \\ \Delta \varepsilon_i = \frac{\Delta R_i}{R_0}, \quad \Delta \varepsilon_i^* = \frac{\Delta R_i}{R_0 \Delta t_i}, \quad \Delta \sigma_{i+1} = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} + \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i^*} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Расчет производится путем шагового счета, т. е. для участка времени Δt_{i+1} рассматривается изменение скорости жидкости в регулирующем органе $v(t_{i+1})$ и определяется ΔR_{i+1} . По ΔR_{i+1} находится $p_\theta(t_{i+1})$ в демпфере. Затем цикл расчета повторяется до R_{\max} , т. е. до обжатия внутренней стенки по наружной. Расчет легко программируется для счета на цифровых ЭВМ и занимает немного машинного времени.

3. Экспериментальное исследование эффективности кольцевого демпфера пластических деформаций. Испытание опытной конструкции демпфера проводилось на насосном стенде, работающем на воде. В гидравлическую схему испытания, показанную на фиг. 4, входят следующие элементы — насос 1, демпфер 2, пироклапан 3 и емкость 4. Датчики располагаются в точках (1), (2), (3), (4) в гидравлической системе; результаты замера давлений обозначены индексами I, II, III, IV.

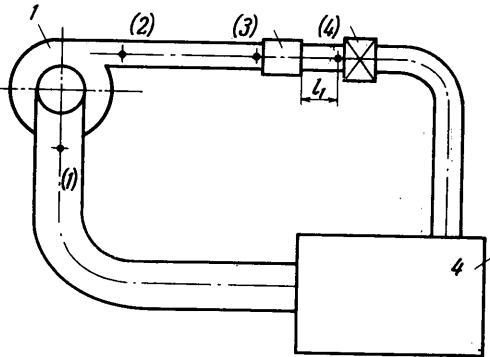
В процессе испытания при помощи дроссельных устройств и подпорных шайб устанавливался необходимый расход воды и начальное давление. Давления по гидравлическому тракту измерялись при помощи датчиков давления типа ДД — 10 совместно с измерительной аппаратурой типа ИД — 2И. Датчики вворачивались в специальные бобышки, сваренные в трубопровод так, чтобы мембрана датчика располагалась на уровне внутренней стенки трубопровода, что исключало погрешности измерения за счет измерительного тракта.

Гидравлический удар в системе создавался путем перекрытия магистрали пироклапаном. Время срабатывания пироклапана $t = 2 \cdot 10^{-3}$ сек. Регистрация показаний датчиков давления производилась на барабанной кассете осциллографа 9SO-1F2. Скорость протяжки фотобумаги составляла примерно $v = 8$ м/сек. При записи давлений гидроудара применялся шлейф типа 4, что обеспечивало запись без искажения динамических процессов до $f = 1500$ гц. Тарировка датчиков совместно с измерительной аппаратурой и шлейфами производилась статически перед каждым испытанием. При тарировке использовались манометры класса 0.6.

Последовательно для трех испытаний (1), (2), (3) приводим значения давлений $p_I, p_{II}, p_{III}, p_{IV}$ [атм], полученные в результате обработки осциллографических записей каждого из датчиков:

	p_I	p_{II}	p_{III}	p_{IV}
(1)	—	216	235	235
(2)	19	—	80	131
(3)	20	—	72	150

Для оценки эффективности кольцевого демфера пластических деформаций были проведены три испытания с расходом воды $G = 30$ кг/сек и давлением на выходе из насоса $p = 30$ атм: (1) — без установки демфера с замером давлений гидроудара в точках II, III и IV. (2) и (3) с установленным демфером перед пироклапаном и замером давлений гидроудара в точках I, III и IV (фиг. 4).



Фиг. 4

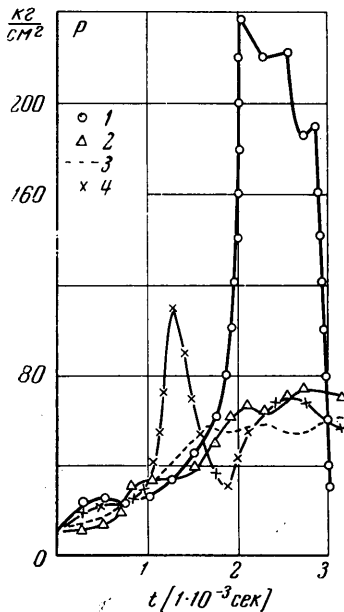
4. Расчет давлений гидроудара в гидравлической системе с кольцевым демфером пластических деформаций. Для определения точности предлагаемой методики расчета давлений гидроудара в гидравлической системе с кольцевым демфером пластических деформаций был проведен расчет гидроудара в системе, испытания которой описаны в предыдущем параграфе. Расчетная система гидравлической магистрали с демфером и регулирующим органом показана на фиг. 2.

В данном случае в качестве граничного условия принимался закон изменения давления у регулирующего органа (что практически равноценно принятию закона изменения скорости). Закон изменения давления по времени получен экспериментальным путем при помощи датчика давления, установленного в точке IV (фиг. 5). Расчет давлений гидроудара в демфере производился по формулам (2.9). В этом случае в формуле (2.9) изменяются только выражения для A и B , которые принимают вид:

$$A_{i+1} = \frac{\rho a_2}{1 + F_1 a_2 / F_2 a_1} \left\{ v_{20} - \frac{F_1}{F_2} v_0 + 2 \frac{F_1}{F_2} \frac{1}{a_1 \rho} \times \right. \\ \times p_1 \left[0, \left(t_{i+1} - \frac{l_1}{a_1} \right) \right] + \frac{p_{20}}{a_2 \rho} \left(1 + \frac{F_1 a_1}{F_2 a_2} \right) - \\ \left. - 2\varphi_2 \left[0, \left(t_{i+1} - \frac{2l_2}{a_2} \right) \right] - 2\psi_1 \left[l_1, \left(t_{i+1} - \frac{2l_1}{a_1} \right) \right] \right\} \quad (4.1)$$

$$B = \frac{\pi l_d \rho}{F_2 / a_2 + F_1 / a_1}$$

$$\psi_1(l_1, t_{i+1}) = \frac{1}{a_1 \rho} \left[p_d(t_{i+1}) - p_d \left(t_{i+1} - \frac{l_1}{a_1} \right) \right] + \\ + \psi_1 \left[l_1, \left(t_{i+1} - \frac{2l_1}{a_1} \right) \right]$$



Фиг. 5

Приводим исходные данные для расчета.

Длина трубопровода перед демпфером, м	l_1	$= 0.130$
Длина трубопровода после демпфера, м	l_2	$= 1.320$
Длина демпфера (по внутренней стенке), м	l_3	$= 0.052$
Скорость распространения звука в воде, м/сек	$a_{ж}$	$= 1524$
Скорость распространения звука в трубопроводе перед и после демпфера, м/сек	a_1, a_2	$= 1300$
Площадь проходного сечения трубопроводов, м ²	F_1, F_2	$= 0.313 \cdot 10^{-2}$
Толщина внутренней стенки демпфера, м	δ	$= 0.35 \cdot 10^{-3}$
Плотность металла внутренней стенки демпфера, гк·сек ² /м ⁴	$\rho_в$	$= 3.15 \cdot 10^{-14}$
Плотность жидкости, гк·сек ² /м ⁴	$\rho_{ж}$	$= 1.06 \cdot 10^{-14}$
Объемный модуль упругости жидкости, кг/м ²	$E_{ж}$	$= 2.49$
Модуль упругости материала внутренней стенки демпфера, кг/м ²	E	$= 2 \cdot 10^2$
Начальный радиус внутренней стенки демпфера, м	R_0	$= 0.0335$
Радиус наружной стенки демпфера, м	R_2	$= 0.045$
Начальное давление в трубопроводе, кг/м ²	p_0	$= 0.3 \cdot 10^{-2}$
Начальная скорость жидкости в трубопроводе, м/сек	v_{10}	$= 10$

На фиг. 5 приведены экспериментальная 2 и теоретическая 3 кривые изменения давления гидроудара по времени в точке III гидравлической магистрали с кольцевым демпфером пластических деформаций. Для сравнения приведена кривая давления гидроудара в гидравлической системе без демпфера I; а также экспериментальная кривая гидроудара 4 в точке IV в системе с демпфером, принятая в качестве граничного условия. Анализируя результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Кольцевой демпфер пластических деформаций гасит примерно 65% максимального давления гидроудара в магистрали без демпфера.

2. Как видно из графика (фиг. 5), расхождение между теоретической и экспериментальной кривой достигает 20% от экспериментального значения гидроудара.

Поступило 24 III 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Жмудь А. Е. Гидравлический удар в гидротурбинных установках. Гостехиздат, 1953.
2. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Изд-во АН СССР, 1949.
3. Крылов А. И. Лекции о приближенных вычислениях. Физматгиз, 1949.
4. Рахматулин К. А., Демьянов О. И. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. Физматгиз, 1961.
5. Синюков А. И., Михеев И. С. Механические свойства металлов при различных скоростях деформаций и температурах. Оборонгиз, 1958.