

УДК 539.3

## **ДИНАМИКА ТРУБОПРОВОДА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ В ПОТОКЕ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ ЖИДКОСТИ\*)**

**Л.В. Смирнов, В.Ф. Овчинников, В.М. Силантьева, А.В. Яскеляин,  
А.А. Горбунова, Д.В. Капитанов**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*

Обсуждаются физические особенности, математическое описание и методика численного расчета взаимодействия оболочки криволинейного трубопровода с волновым процессом в потоке жидкости. Причиной рассматриваемого волнового процесса является гидравлический удар при изменении гидравлического сопротивления в гидросистеме. Для демонстрации подхода по оценке возникающего в трубопроводе напряженно-деформированного состояния рассмотрен пример. Показано, что при некотором соотношении параметров системы возможен резонанс со значительными по величине напряжениями в оболочке трубопровода.

*Ключевые слова:* трубопровод, гидравлический удар, колебания, резонанс, напряженно-деформированное состояние.

Одним из наиболее распространенных элементов конструкции многих технических объектов и систем является трубопровод с движущейся жидкостью, и от его функционирования в значительной мере зависит надежность и эффективная работа этих объектов и систем. Для решения задач, встающих при проектировании трубопроводов, а иногда и при идентификации причин их разрушения, имеются соответствующие программные комплексы и методы расчета возникающих при эксплуатации возмущений. Примером может служить разработанный, используемый и развивающийся программный комплекс RANT [1, 2]. Важным видом воздействий, испытываемых трубопроводом, являются гидродинамические силы со стороны потока транспортируемой среды. Настоящая работа является естественным продолжением ранее проводившихся исследований динамики гидросистем и колебаний трубопроводов и других конструкций под действием обусловленных сжимаемостью транспортируемой среды волновых процессов [3, 4]. Обсуждаются возникающие при этом колебания трубопровода, причины их возникновения и методика расчета этих волновых процессов, обычно называемых гидравлическим ударом.

### **1. Воздействия нестационарного потока на трубопровод**

Не останавливаясь на имеющихся в предыдущих публикациях [1, 2] особенностях разработанного программного комплекса RANT, рассмотрим связь действующую

---

\*) Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ России (проект НШ-4807.2010.8).

щих на трубопровод гидродинамических сил при стационарной и нестационарной составляющих скорости и давления потока жидкости, предполагающегося одномерным.

В общем случае взаимодействие трубопровода с внутренним потоком жидкости носит двусторонний характер: пульсации внутреннего потока жидкости вызывают динамические деформации трубопровода, а динамические деформации трубопровода могут стать причиной пульсаций потока в гидросистеме, частью которой является трубопровод. Эти особенности учтены в соответствующих математических моделях. Однако имеется целый ряд прикладных задач, решение которых с достаточной для практики точностью можно построить в приближении заданного поля, то есть пренебрегая одной из указанных связей.

В [5] рассмотрена задача возбуждения пульсаций давления в гидросистеме, вызванных заданным движением криволинейного трубопровода без нарушения его конфигурации и целостности (например, при сейсмических и ударных воздействиях). Хотя возникающий при этом уровень пульсаций давления не представляет непосредственной опасности для прочности трубопровода, он может вызвать несанкционированное срабатывание систем автоматики, повлиять на работу оборудования, находящегося на значительном расстоянии от источника возмущения.

Рассматриваемым в настоящей работе важным классом задач является анализ поведения трубопроводных систем при наличии возмущений в виде значительных пульсаций давления в гидросистеме. Наиболее часто встречающимся видом таких возмущений является гидравлический удар, вызываемый работой запорно-регулирующих устройств. Ниже исследуется задача динамики криволинейного трубопровода при наличии в гидросистеме периодических затухающих пульсаций давления, возникающих при гидравлическом ударе. Отметим два механизма воздействия пульсаций внутреннего потока жидкости на напряженно-деформированное состояние (НДС) трубы. Во-первых, это окружные деформации оболочки трубы, обусловленные действием внутреннего давления, а также возникающие в соответствии с эффектом Пуассона продольные деформации трубы. Эти процессы деформации характеризуются временами порядка  $10^{-3}$  с, и для оценки их влияния на поведение трубопроводов используется квазистатический подход, никакие резонансные эффекты при этом не проявляются. Уровень возникающих напряжений в оболочке трубы оценивается величиной

$$\sigma = P \frac{D}{2h},$$

где  $P$  – действующее внутреннее давление;  $D, h$  – диаметр и толщина стенки трубы. Второй механизм реализуется за счет пульсаций давления ( $P$ ) и скорости потока жидкости ( $V$ ) на участках трубопровода с ненулевой кривизной оси, вызывающих нестационарные поперечные к оси трубы силы, которые могут возбудить поперечные колебания трубопровода. Частоты пульсаций параметров внутреннего потока могут оказаться близкими к одной из собственных частот поперечных колебаний трубопровода, в результате чего могут реализоваться резонансные колебания. Действующая в местах изгиба трубопровода поперечная сила оценивается величиной

$$R = 2(P + \rho V^2)S \sin(\alpha/2), \quad (1)$$

где  $S$  – площадь внутреннего сечения трубы,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\alpha$  – уголгиба трубы. Существенный вклад скорости потока жидкости в выражение силы (1)

реализуется только в особых аварийных режимах нагружения, связанных, например, с разрывом трубопровода полным сечением. Для большинства режимов эксплуатации, в том числе и для режима гидравлического удара, сила (1) определяется нестационарным внутренним давлением ( $P \gg \rho V^2$ ).

В случае представляемого как пространственный стержень трубопровода изменение давления вызывает НДС, обусловленное взаимодействием изгибных в двух плоскостях, продольных и крутильных деформаций. В расчетах, проведенных с использованием программного комплекса RANT, был учтен этот фактор.

## **2. Причины и методика расчета возникающих при гидравлическом ударе волновых процессов в потоке движущейся в трубопроводе жидкости**

В качестве основной и рассматриваемой в работе причины волнового процесса в трубопроводных системах, часто называемого гидравлическим ударом, принято изменение гидравлического сопротивления. Это изменение вызывается работой запорно-регулирующих устройств, изменением режимов работы гидромашин, входящих в состав гидросистем. Можно также указать некоторые более редко рассматриваемые причины возникновения таких процессов. Одной из них является турбулентность и образование вихрей, когда в гидросистеме возбуждаются собственные одномерные колебания давления и скорости перекачиваемой жидкости. Рассматриваются также случаи возбуждения пульсаций давления и скорости в потоке при движении трубопровода без нарушения его конфигурации и целостности, например при сейсмических и ударных воздействиях [5]. Еще одним источником возбуждения волнового процесса является разгерметизация находящейся под давлением гидросистемы.

В большинстве рассматриваемых в литературе случаев в качестве причины значительных деформаций и разрушения трубопровода указывается опасность резкого повышения давления, и под термином «гидравлический удар» подразумевается скачок давления, который может быть оценен по формуле Жуковского [6]. Такая консервативная оценка давления справедлива для быстрой, а в пределе – для мгновенной остановки потока:

$$P - P_0 = \rho V_0 c, \quad (2)$$

где  $P_0$ ,  $V_0$ ,  $P$  – давление и скорость жидкости до и после удара;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и скорость звука в жидкости. При  $c = 10^3$  м/с,  $V_0 = 10$  м/с и  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> имеем  $P - P_0 = 10$  МПа.

Однако важным для оценки опасности гидравлического удара для трубопровода является не только указанное быстрое повышение давления, но и неизбежно возникающий в содержащей трубопровод гидросистеме волновой процесс. В качестве примера исследования влияния такого процесса на трубопровод можно указать на опубликованный в монографии [4] результат решения задачи идентификации причины опасных колебаний паропровода на одном из блоков АЭС. Причиной колебаний оказался акустико-механический резонанс, при котором возбуждение собственных колебаний среды в паровом тракте, обусловленных ее сжимаемостью, привело к резонансным колебаниям паропровода. Существенную роль сыграли благоприятные условия перекачки энергии акустических колебаний в механические. В другом случае (см. [3]) взаимодействие волнового процесса в гидросистеме с обратным клапаном привело к жестокому возбуждению автоколебаний, сопровождаю-

щихся периодически повторяющимся гидравлическим ударом. При этом наблюдались значительные колебания трубопровода.

В обоих указанных исследованиях расчеты волновых процессов в состоящей из системы трубопроводов гидросистеме проводились численно с использованием математической модели, описывающей динамику одномерного напорного течения вязкой сжимаемой жидкости с применением метода характеристик [6]. Обычно используемая математическая модель, содержащая уравнение количества движения и уравнение неразрывности с учетом уравнения состояния для считающихся адиабатическими процессов, имеет вид:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{c^2}{gS^2} \frac{\partial Q}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} + J = 0, \quad (3)$$

где  $y = P/(\rho g) + z$  – пьезометрический напор,  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность жидкости,  $Q(s, t)$  – объемный расход,  $S$  – площадь поперечного сечения потока,  $s$  – пространственная координата вдоль оси потока,  $t$  – время,  $c$  – скорость звука в жидкости с учетом упругой податливости стенок трубопровода,  $J$  – обусловленный касательными напряжениями приходящийся на единицу длины гидравлический уклон, характеризующий потери на трение и определяемый приближенно по эмпирическим формулам, справедливым для стационарных и квазистационарных течений [7]. Для расчетов волновых процессов в случае сложной разветвленной гидросистемы необходимо задать ее геометрию, добавить условия неразрывности в узлах, которыми являются элементы соединения и разделения потоков, а также начальные и краевые условия и возмущения.

### 3. Пример расчета динамического поведения трубопровода при гидравлическом ударе и возникающем волновом процессе

Для демонстрации предлагаемого подхода, получения качественного представления о характере возникающих при гидравлическом ударе процессов в потоке и трубопроводе и зависимости этих процессов от параметров выполнены расчеты для относительно простого случая гидросистемы и геометрии трубопровода. Имеющиеся программные средства и опыт практических расчетов позволяют проводить расчеты для сложных гидросистем для практически любой геометрии трубопровода и любого вида возмущения. Целью таких расчетов может быть оценка допустимости возникающих в трубопроводе напряжений.

С использованием комплекса RANT и программы расчета волнового процесса в жидкости проведены исследования динамических процессов, происходящих в гидросистеме, представленной на рис. 1.

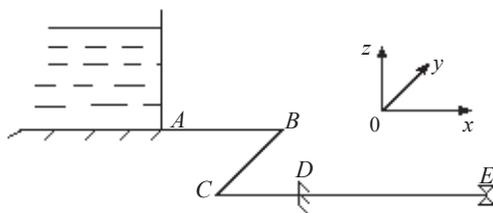


Рис. 1

Система выполнена из трубы, имеющей внешний диаметр 273 мм и толщину стенки 8 мм. Материал трубы – сталь, модуль упругости которой равен 197 ГПа,

плотность –  $7800 \text{ кг/м}^3$ ; плотность заполняющей трубопровод воды составляет  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Общая длина трубы равняется  $15 \text{ м}$ , в состав системы входит Z-образный участок  $ABCD$ , граничные сечения которого жестко заделаны. Длины участков  $AB$  и  $BC$  равны  $3 \text{ м}$ , а участка  $CD$  –  $1,75 \text{ м}$ .

Давление в сечении  $A$  трубопровода составляет  $2 \text{ МПа}$ , в исходном состоянии по трубопроводу течет вода со скоростью  $1,65 \text{ м/с}$ . В начальный момент времени в сечении  $E$  гидросистемы реализуется мгновенное закрытие клапана, в результате чего в трубопроводе возникает волновой процесс. На рис. 2 представлен график изменения давления в сечении  $C$  трубопровода. При прохождении волны сжатия давление в трубе достигает уровня  $4,338 \text{ МПа}$ , а соответствующие окружные напряжения в оболочке трубы –  $69,68 \text{ МПа}$ . Пульсации давления создают переменные силы в сечениях  $B$  и  $C$  криволинейного участка. Частота пульсаций составляет  $26,96 \text{ Гц}$ , а низшая частота собственных колебаний Z-образного участка трубы в плоскости равна  $26,53 \text{ Гц}$ . В конструкции возникают условия появления резонансных колебаний. На рис. 3 показан процесс колебаний сечения  $B$  трубопровода в направлении оси  $Oy$  для уровня внутреннего затухания в материале трубы  $5\%$  от критического. Максимальная амплитуда резонансных колебаний трубопровода в этом сечении достигает величины  $31 \text{ мм}$ .

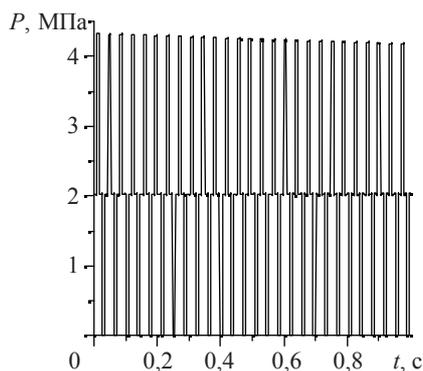


Рис. 2

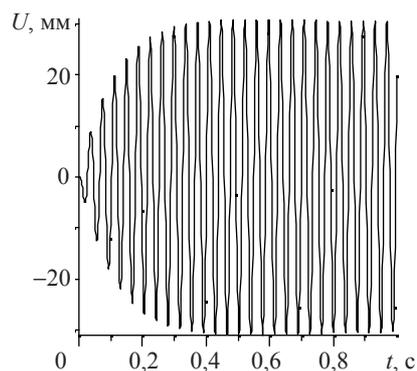


Рис. 3

В процессе колебаний самый высокий уровень переменных напряжений возникает в сечении  $D$ , характер изменения этих напряжений показан на рис. 4.

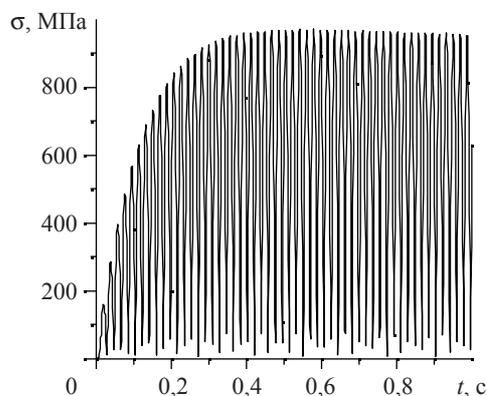


Рис. 4

Максимальные напряжения составляют 971 МПа, что на порядок превышает уровень возникающих окружных напряжений в оболочке трубы и представляет опасность.

### **Заключение**

Кратко описанная и продемонстрированная на примере методика расчета гидравлического удара и вызываемого этим процессом НДС трубной оболочки позволяет сделать следующие выводы. Опасность для трубопровода при гидравлическом ударе представляет не только значительное возрастание давления, но и колебательный процесс, обусловленный зависящим от времени и продольной координаты гидродинамическим воздействием. Рост давления вызывает в оболочке трубопровода высокий уровень окружных напряжений, а возникающий в потоке волновой процесс является источником возбуждения пространственных колебаний, уровень напряжений при которых может оказаться значительным.

Для обоснования эксплуатационной надежности трубопровода разработаны математические модели и программные комплексы расчетов волновых процессов в потоке транспортируемой жидкости и вызываемых этими процессами деформаций трубопровода. Рассмотренный простой пример системы «трубопровод–жидкость» дает наглядное качественное представление о протекающих в системе процессах, а также свидетельствует о важности и необходимости проведения соответствующих расчетов при проектировании и анализе поведения трубопроводных систем при гидравлическом ударе.

### *Литература*

1. Программный комплекс RANT. Программа расчета трубопроводов на статическую прочность, вибропрочность и сейсмические воздействия. Рег. номер ПС в ЦОЭП при РЦН КИ №496 от 10.11.2002 г. Рег. номер паспорта аттестации ПС №155 от 28.03.2003 г.
2. Моделирование статических и динамических деформаций трубопроводных систем на опорах с нелинейными характеристиками / И.В. Бурмистров [и др.] // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2009. – Вып. 71. – С. 95–103.
3. Динамика конструкций аэроупругих систем / К.В. Фролов [и др.]. – М.: Наука, 2002. – 397 с.
4. Динамика и прочность водо-водяных энергетических реакторов / Отв. ред. Н.А. Махутов. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
5. Яскеляин, А.В. Исследование гидравлического удара в жидкости при колебаниях трубопровода / А.В. Яскеляин // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2008. – Вып. 70. – С. 62–70.
6. Аронович, Г.В. Гидравлический удар и уравнительные резервуары / Г.В. Аронович, Н.А. Картвелишвили, Я.К. Любимцев. – М.: Наука, 1968. – 248 с.
7. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

[28.08.2010]

**THE DYNAMICS OF A PIPELINE UNDER A HYDRAULIC SHOCK  
IN THE FLOW OF THE TRANSPORTED LIQUID**

**L.V. Smirnov, V.F. Ovchinnikov, V.M. Silantyeva, A.V. Yaskelyain,  
A.A. Gorbunova, D.V. Kapitanov**

The physical characteristics and the methodology of mathematically describing and numerically analyzing the shell of a curvilinear pipeline with a wave process in the liquid flow are discussed. The wave process is assumed to be caused by a hydraulic shock resulting from the change of the hydraulic resistance in the hydrosystem. To demonstrate the approach to determining the stressed-strained state developing in the pipeline, an example is analyzed. It is shown that for a certain combination of the parameters, the resonance is possible with considerable stresses in the shell of the pipeline.

*Key words:* pipeline, hydraulic shock, vibrations, resonance, stress-strained state.