

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТРУБОПРОВОДА С ЖИДКОСТЬЮ
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ***

© 2013 г. **С.В. Зефирова, А.В. Кочетков, В.Ф. Овчинников,
А.О. Савихин, Л.В. Смирнов, А.В. Яскеляин**

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

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 20.12.2012

Приводятся результаты численного моделирования динамики пространственного протяженного трубопровода как гидроупругой системы при локальном ударном воздействии. Процесс удара падающего груза на трубопровод моделируется в плоской постановке с учетом совместного движения груза, оболочки трубопровода и заполняющей жидкости и с учетом нелинейных факторов – больших перемещений и деформаций, ударных волн и кавитации в жидкости. В результате получены характеристики сил, воздействующих на трубопровод. Деформационное движение трубопровода в целом моделируется квазиодномерными уравнениями динамики стержней. Гидроударные процессы во внутренней жидкости рассчитываются методом характеристик. Решение задачи деформирования трубопровода получено методом разложения по собственным формам колебаний. Показано, что вклад непосредственно удара груза на уровень перемещений трубопровода соизмерим с вкладом гидроударных явлений в трубопроводе. При этом уровень напряжений в трубопроводе определяется, в основном, гидроударными явлениями.

Ключевые слова: удар, математическое моделирование, нелинейное деформирование, гидроудар, гидроупругость, трубопровод.

Исследования деформации трубопроводов, содержащих жидкость, при импульсном нагружении актуальны в связи с многочисленными приложениями в нефтегазовой промышленности и атомном машиностроении. В частности, для предотвращения аварийных ситуаций необходимо с высокой степенью достоверности оценивать прочность трубопроводных систем при ударных нагрузках. Достигнутые к настоящему времени успехи в решении подобных задач ограничиваются подходами, либо не учитывающими заполняющую жидкость [1, 2], либо в упрощенных поста-

* Работа выполнена при финансировании РФФИ (гранты № 13-08-00219, 13-08-97091, 11-08-97040-р_поволжье_a), Федеральными целевыми программами «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технического комплекса России» на 2007–2013 годы (ГК 14.515.11.0056).

новках [3], не позволяющих описывать волновые процессы в трубопроводной системе в целом.

В настоящей работе на примере конкретного трубопровода продемонстрирована методика расчета динамики пространственного протяженного трубопровода как гидроупругой системы при локальном ударном воздействии. Геометрия рассматриваемого пространственного трубопровода представлена на рис. 1.

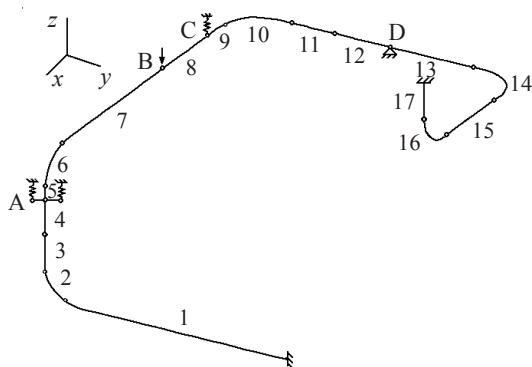


Рис. 1

Параметры трубопровода соответствуют проекту реактора на быстрых нейтронах FENIX. Наружный диаметр трубы составляет 457 мм, толщина стенки 7 мм, материал – сталь с модулем упругости $E = 200$ ГПа, плотностью $\rho = 7800$ кг/м³. Внутри труба заполнена жидкостью плотностью $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³. Концевые сечения трубы жестко заделаны, в сечениях А, С расположены упругие подвески с жесткостью 100 Н/мм, действующие в вертикальном направлении, в сечении D расположена опора скольжения, допускающая перемещения трубы в горизонтальной плоскости. Длины прямых участков представлены в таблице 1. Радиусы гибов трубопровода равны 700 мм.

Таблица 1

№	1	3	4	5	7	8	9	11	12	13	15	17
Длина, мм	3700	700	700	300	3000	1400	400	1000	1000	1700	1700	800

Исследуется поведение трубопровода при ударе со следующими характеристиками. Массивное прямоугольное тело массой 38,6 кг, с размерами 240 мм × 240 мм × 60 мм, движущееся со скоростью $V_0 = 10$ м/с вертикально вниз, ударяется в окрестности точки В в неподвижный трубопровод, заполненный жидкостью. В результате такого воздействия тело тормозится, а трубопровод приходит в движение. В рассматриваемом процессе можно выделить две фазы: короткая фаза удара и относительно длинная фаза деформационного движения трубопровода. Характерное время фазы удара – миллисекунды, а длительность фазы вызываемого ударом движения трубопровода – секунды. Такая большая разница в характерных временах дает возможность разделить исходную задачу на две слабосвязанные.

Первая задача – моделирование фазы удара массы по трубопроводу, заполненному жидкостью. Эта задача в плоской постановке (рис. 2) была рассмотрена и проанализирована в [3].

В результате решения задачи удара тела по трубе в указанной выше постановке получены временная зависимость силы P , действующей на трубопровод в процессе

удара, и представленная на рис. 3 зависимость от времени среднего по сечению давления в жидкости в окрестности места удара.

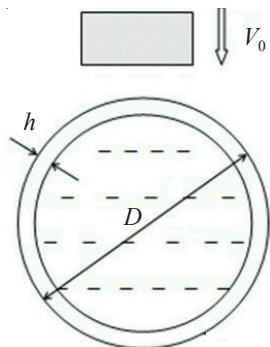


Рис. 2



Рис. 3

Численное моделирование соударения тела-ударника с трубопроводом осуществляется в плоской постановке на основе вариационно-разностного метода в лагранжевых переменных, реализованного в пакете прикладных программ (ППП) «Динамика-2» [4, 5]. Процессы динамики груза, деформации оболочки трубопровода и движения жидкости моделировались в связанной гидроупругой постановке с учетом сопутствующих нелинейных факторов – больших перемещений и деформаций, формоизменения контактных поверхностей, отрыва тел и сред друг от друга и кавитации в жидкости. Использование плоского приближения для задачи соударения вносит определенные ошибки, но, в целом, правильно отражает протекающие процессы и дает консервативные оценки динамических параметров нагружения.

Возникающее при ударе пространственное движение трубопровода обусловлено двумя причинами. Во-первых, это непосредственное кратковременное силовое воздействие на трубопровод со стороны ударяющей массы и, во-вторых, действие на трубопровод нестационарного внутреннего давления, возникающего в трубопроводе при сжатии жидкости (гидравлический удар). Источником этого процесса является возникающий при ударе по трубопроводу импульс давления, который распространяется по жидкости внутри трубопровода, отражается от граничных сечений и создает нестационарное пространственно-временное поле давления.

Исследования возникающего в трубопроводе в результате внешнего воздействия явления гидравлического удара проводились с использованием модели напорного течения вязкой сжимаемой жидкости в упругом трубопроводе. Математическая модель содержит: одномерное уравнение движения среды, уравнение неразрывности с учетом уравнения состояния для адиабатического процесса [6], начальные и граничные условия. Граничные условия соответствуют считающимся постоянными значениям давления на концах трубопровода и импульсу давления во внутреннем сечении трубопровода в точке ударного воздействия (см. рис. 3). Численное интегрирование уравнений модели проводилось на основе метода характеристик [6]. Пример подобного расчета, проведенного с целью изучения волнового процесса в трубопроводе, обусловленного сжимаемостью жидкости, представлен в работе [7].

При моделировании фазы движения трубопровода (см. рис. 1) используются квазиодномерные уравнения малых колебаний пространственных трубопроводов с потоком жидкости [8]. С использованием разложения решения по системе базис-

ных функций исходная задача сводится к численному исследованию системы обыкновенных дифференциальных уравнений [9, 10]. Внешние воздействия на трубопровод со стороны тела-ударника и пульсаций внутреннего потока жидкости учтены в этих уравнениях соответствующими обобщенными силами [7]. Методика численного исследования динамики разветвленных трубопроводных систем реализована в рамках программного комплекса RANT [11].

На рис. 4 показано изменение во времени давления в жидкости в сечении первогогиба трубопровода $s = 4,24$ м, где s – длина осевой линии трубопровода, отсчитываемая в порядке нумерации его участков (см. рис. 1, табл. 1). Вид пульсаций давления одинаков во всех сечениях трубопровода, но изменяется в соответствии с распространением волны гидравлического удара. Наблюдаются многократные отражения импульсов от концов трубопровода и постепенное затухание амплитуд вследствие диссипативных сил. Полученные распределения гидродинамических давлений используются в качестве нагрузок при решении задачи динамического деформирования трубопровода с жидкостью в целом.

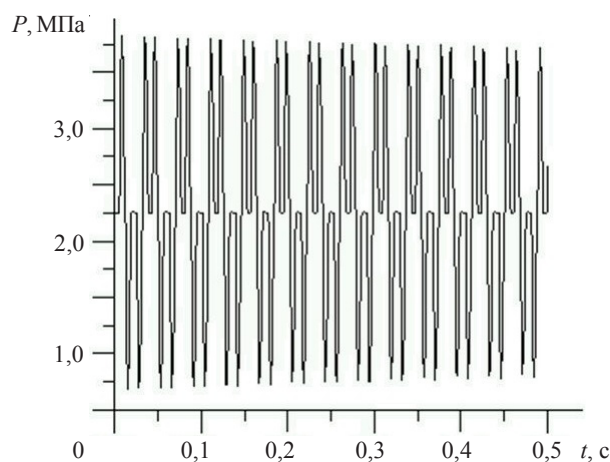


Рис. 4

Рассмотрены три расчетных варианта:

- динамика трубопровода, обусловленная только силовым воздействием со стороны груза;
- динамика трубопровода, обусловленная только воздействием пульсаций давления жидкости, возникающих при ударе груза по трубе;
- динамика трубопровода, обусловленная суммарным воздействием указанных двух факторов.

Сравнительный анализ результатов решения указанных трех задач дает возможность оценить качественное и количественное влияние на динамику трубопровода непосредственного удара груза и возникающих при этом пульсаций давления в заполняющей трубопровод жидкости. Силовое воздействие со стороны груза задавалось постоянной динамической силой, действующей в течение 7 мс в сечении В трубопровода (см. рис. 1), так, чтобы импульс этой силы был равен начальному импульсу ударника. Для оценки влияния массы заполняющей жидкости проведен расчет для пустого трубопровода (рис. 5) и трубопровода, заполненного жидкостью (рис. 6).

При ударном воздействии максимальная величина перемещений реализуется в середине участка 6 трубопровода в направлении оси y (см. рис. 5, 6).

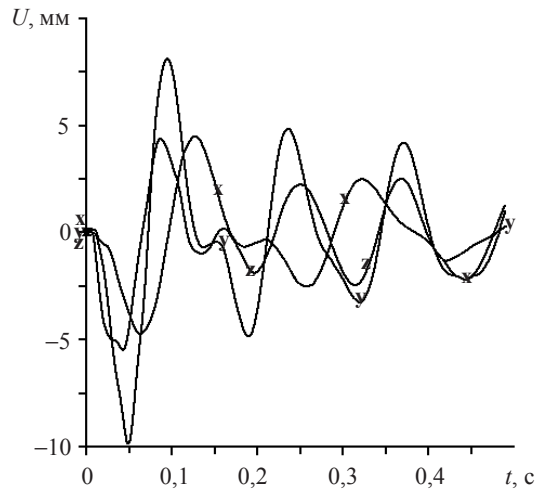


Рис. 5

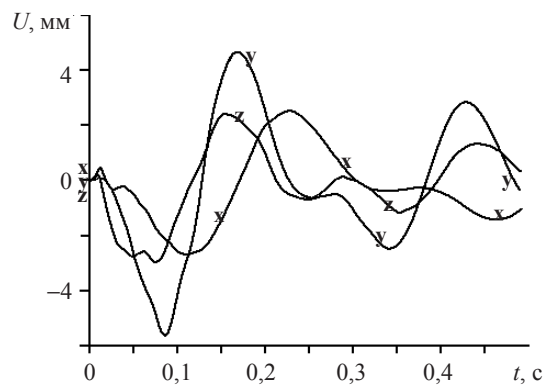


Рис. 6

При расчетах рассмотрены перемещения по трем направлениям общей системы координат xuz (см. рис. 1). По сравнению с вариантом трубы без жидкости процесс движения для трубы с жидкостью становится более плавным, уровень отклонений трубы снизился в два раза. Это является следствием соответствующего увеличения массы конструкции при сохранении неизменной ее жесткости. Анализ стержневых напряжений для варианта трубы, заполненной жидкостью, показал, что на участках, примыкающих к сечениям заделки трубопроводов, и на опоре D уровень напряжений приблизительно одинаков, достигает значения порядка 29 МПа, что в 1,6 раза меньше, чем для случая трубопровода без жидкости. Максимальные напряжения возникают в течение 0,05 с после удара.

В случае деформации трубопровода при воздействии пульсаций давления в жидкости также возникают высокочастотные составляющие перемещений трубопровода, связанные с частотой этих пульсаций. Общий уровень динамических перемещений находится на том же уровне, что и при ударном воздействии груза, что видно на рис. 7, где показаны перемещения на участке 6. Максимальный уровень

напряжений реализуется в начале участка 1 (заделка) и достигает значения порядка 120 МПа, что в 4 раза больше, чем для случая учета только ударного воздействия на трубопровод.

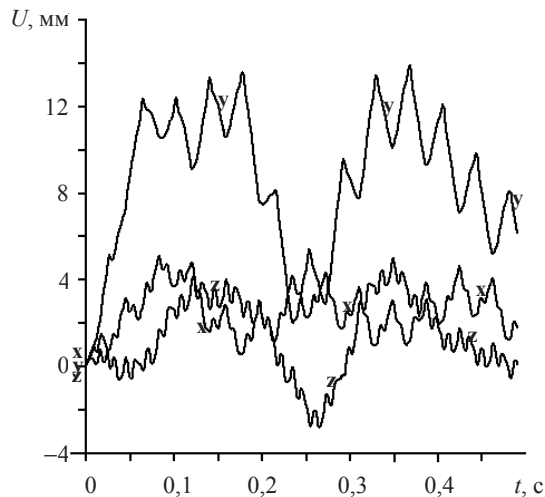


Рис. 7

При этом высокий уровень динамических напряжений практически на всем контрольном интервале времени (0,5 с) сохраняется приблизительно одинаковым. Это является следствием относительно слабого затухания гидроударных явлений в трубопроводе.

Перемещения трубопровода в середине участка 6 при комплексном воздействии груза и внутреннего давления жидкости показаны на рис. 8.

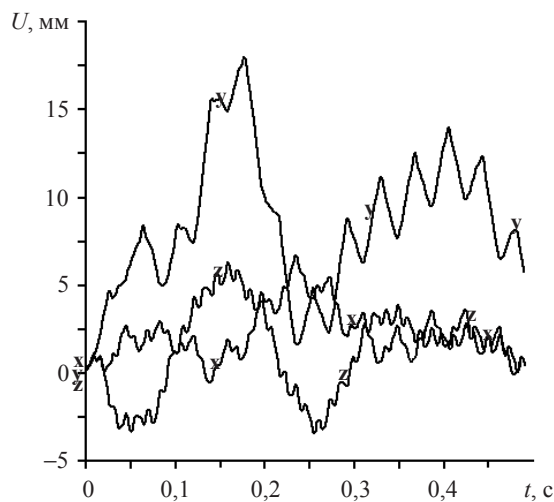


Рис. 8

При комплексном динамическом воздействии реализуется вариант движения, в котором представлены и низкочастотные, и высокочастотные процессы. Максимальный уровень напряжений реализуется в начале участка 1 (заделка) в момент времени $t = 0,15$ с и достигает значения порядка 128 МПа.

Выводы

На примере пространственного трубопровода для демонстрации методики расчета проведено исследование динамических процессов, возникающих при локальном ударном воздействии на трубопровод падающим грузом. Удар приводит к формированию импульса давления в заполняющей трубопровод жидкости. Образовавшийся импульс давления распространяется по трубопроводу, отражается от его концов и создает в каждом сечении трубопровода периодические пульсации давления. Под воздействием удара груза и возникших в результате этого удара пульсаций давления реализуется процесс движения трубопровода. Проведенное исследование показало, что вклад непосредственно удара груза на уровень перемещений трубопровода соизмерим с вкладом гидроударных явлений в трубопроводе. При этом уровень напряжений в трубопроводе определяется, в основном, гидроударными явлениями.

Список литературы

1. *Баженов В.Г., Кибец А.И., Кочетков А.В.* Численное моделирование деформирования газопровода высокого давления при соударении с фрагментами разрушенных труб // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. №1. С. 106–110.
2. *Котов В.А., Корюкин Д.Г., Кочетков А.В.* Моделирование соударения подземного трубопровода с пластиной в плоской постановке // Вестник ННГУ. Сер. Механика. 2000. Вып. 2. С. 67–73.
3. Численное моделирование деформирования трубопровода с жидкостью при ударном нагружении / С.В. Зефирова, А.В. Кочетков, И.А. Мясумов, А.О. Савихин // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2011. Вып. 73. С. 113–119.
4. *Баженов В.Г., Зефирова С.В., Кибец А.И.* О численной реализации вариационно-разностной моментной схемы решения нелинейных задач динамики нетонких оболочек при импульсном воздействии // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1988. С. 66–73.
5. Пакет прикладных программ «Динамика-2» / В.Г. Баженов, С.В. Зефирова, А.В. Кочетков и др. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1987. С. 4–13.
6. *Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К.* Гидравлический удар и уравнивательные резервуары. М.: Наука, 1968. 248 с.
7. 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 // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2010. Вып. 72. С. 73–79.
8. *Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В.* Уравнения малых колебаний пространственного трубопровода с текущей жидкостью // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1977. Вып. 7. С. 77–84.
9. *Овчинников В.Ф.* Численное моделирование динамики трубопроводных систем на нелинейных опорах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1997. С. 59–67.
10. Моделирование статических и динамических деформаций трубопроводных систем на опорах с нелинейными характеристиками / И.В. Бурмистров, А.В. Козин, В.Ф. Овчинников, В.А. Панов, Л.В. Смирнов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 95–103.
11. Программный комплекс RANT. Программа расчета трубопроводов на статическую

прочность, вибропрочность и сейсмические воздействия. Рег. номер ПС в ЦОЭП при РНЦ
КИ №496 от 10.11.2002 г. Рег. номер паспорта аттестации ПС №155 от 28.03.2003 г.

**NUMERICALLY MODELING DYNAMIC DEFORMATION OF A SPATIAL PIPELINE
CARRYING A LIQUID UNDER LOCAL IMPACT LOADING**

**S.V. Zefirov, A.V. Kochetkov, V.F. Ovchinnikov, A.O. Savikhin,
L.V. Smirnov, A.V. Yaskelyain**

The results of numerically modeling the dynamics of a spatial big-length pipeline as a hydro-elastic system under local loading are presented. The process of a weight falling onto a pipeline is modeled in a plane formulation, accounting for the joint motion of the weight, pipeline shell and filling liquid, as well as for the nonlinear factors – large displacements and deformations, shock waves and cavitation in the liquid. As a result, characteristics of the forces acting on the pipeline are determined. The deformational motion of the pipeline as a whole is modeled using quasi-one-dimensional dynamic equations of rods. The hydro-shock processes in the internal liquid are calculated using the characteristics method. The problem of deformation of the pipeline is solved using decomposition according to free oscillation forms. The contribution of the impact of the weight itself to the displacement level of the pipeline is shown to be comparable with the contribution of the hydro-shock events in the pipeline, the pressure level inside the pipeline being mainly determined by the hydro-shock events.

Keywords: shock, mathematical modeling, nonlinear deformation, hydro-shock, hydro-elasticity, pipeline.