

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ГИДРОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ТРУБОПРОВОДА С ЖИДКОСТЬЮ  
ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ\***

© 2015 г. **Кочетков А.В., Повереннов Е.Ю., Савихин А.О.**

*Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2015*

Приводятся постановка задачи и результаты численных исследований пространственного процесса динамического взаимодействия ударника с трубопроводом, содержащим жидкость. Анализируются процессы трансформации движения ударника, оболочки трубопровода и жидкости в продольную волну гидроудара. Показываются особенности волновых процессов, происходящих в трубопроводе, анализируются необратимые деформации в стенке трубы, амплитуда и длительность продольной волны в жидкости и в оболочке трубы, влияние краевых условий. Оценивается часть импульса, преобразующаяся в продольную волну гидроудара.

*Ключевые слова:* трубопровод, жидкость, гидроупругость, пластичность, деформация, удар.

**Введение**

Актуальность задачи обусловлена применением трубопроводов в различных сферах деятельности человека. Исследование процессов деформации трубопроводов при ударном нагружении особенно важно для таких отраслей производства, как нефтегазовая промышленность, атомная энергетика и др. Для оценки последствий возможных аварийных ситуаций необходимо исследовать прочность труб под воздействием импульсных нагрузок. Большая часть исследований динамики трубопроводов с заполняющей жидкостью посвящена торцевому импульсному нагружению и изучению возникающего в них гидроудара [1–3]. При интенсивном нагружении наблюдаются нелинейные эффекты упругопластического деформирования в трубопроводе и кавитации в жидкости. На тему ударного нагружения трубопроводов можно найти работы, ранее выполненные авторами настоящей статьи [4–6]. В этих работах описаны исследования бокового удара по трубопроводу, заполненному жид-

---

\* Выполнено при частичном финансировании РФФИ (гранты №15-48-02333-р\_поволжье\_а, №13-08-00219, №14-08-00197, №14-08-31149-мол\_а), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8) и РНФ (грант №14-19-01096) в части постановки трехмерной задачи гидроупругости.

костью, как в плоской [4, 5], так и в пространственной [6] постановках с использованием квазиодномерных моделей.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим пространственную задачу соударения тела, имеющего форму протяженного прямоугольного параллелепипеда, с цилиндрической оболочкой трубопровода, заполненной внутренней жидкостью (рис. 1).

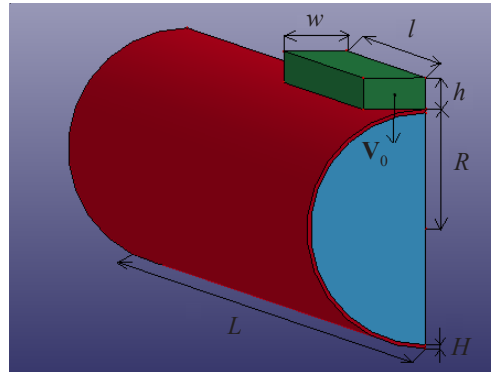


Рис. 1

Начало декартовой системы координат располагается на оси симметрии трубопровода. Будем полагать, что задача имеет две плоскости симметрии  $x = 0$ ,  $z = 0$ . В расчетах берется четверть области определения задачи. Ось  $Oz$  направлена вдоль оси трубопровода, ось  $Oy$  соосна с вектором начальной скорости ударника.

Трубопровод имеет длину  $L = 10$  м, внешний диаметр  $D = 2R = 0,457$  м, толщину стенки  $H = 0,007$  м. Геометрические размеры ударника:  $h = 0,06$  м,  $w = 0,12$  м, длина принимается либо  $l = 1$  м (короткий груз), либо  $l = 5$  м (длинный груз). Оболочка трубопровода и ударник выполнены из стали с параметрами: модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , предел текучести  $\sigma_T = 200$  МПа, модуль упрочнения  $g = 140$  МПа, плотность материала ударника  $\rho_T = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Параметры жидкости (вода): объемный модуль на сжатие  $K = 2250$  МПа, плотность жидкости  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Жидкость не оказывает сопротивление растяжению. Ударник находится на расстоянии  $0,01$  м от трубопровода и имеет начальную скорость  $V_{0y} = -10$  м/с.

Предполагается, что в начальный момент времени внутреннее давление в трубе отсутствует. Все элементы, в том числе и груз, находятся в ненапряженном состоянии. На одном торце граничные условия задаются из условий симметрии. Вторым торцом остается свободным, то есть вектор напряжения на втором торце равен нулю. Численное моделирование процессов осуществляется в трехмерной постановке на основе метода конечных элементов, реализованного в пакете LS-Dyna [7], входящего в состав программного комплекса ANSYS. Оболочка трубопровода и ударник рассматриваются как упругопластическая среда, жидкость – упругая среда без сопротивления сдвигу.

Скорость звука в жидкости с учетом упругости стенок протяженного трубопровода определяется формулой Жуковского [8]:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\rho_{ж}/K + 2\rho_{ж}r/(H \cdot E)}}, \quad (1)$$

где  $K$  – объемный модуль упругости жидкости,  $r$  – внутренний радиус трубы,  $E$  – модуль Юнга для материала трубы. По формуле (1) получим, что волны гидроудара во внутренней жидкости трубы распространяются со скоростью 1146 м/с.

## 2. Сравнение с задачей в плоской постановке

Ранее [4] были получены результаты решения задачи ударного нагружения трубопровода в плоской постановке при тех же параметрах. Численное моделирование задачи в [4] осуществлялось на основе вариационно-разностного метода, реализованного в пакете прикладных программ «Динамика-2» [9]. Расчеты проводились на сетках  $300 \times 3$  ячеек по сечению трубы и  $48 \times 24$  ячеек по ударнику. Внутренняя полость трубы покрывалась сеткой из 34000 четырехугольных ячеек. На рис. 2 приведены зависимости от времени средних значений давления в жидкости (рис. 2а) и окружного напряжения в оболочке (рис. 2б) [4].

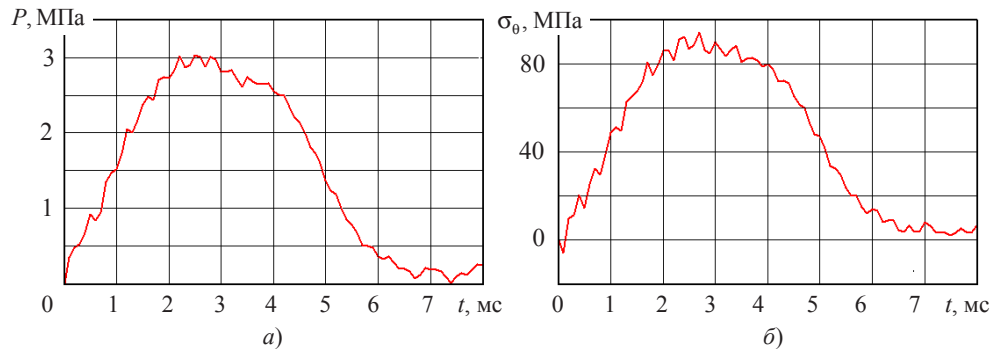


Рис. 2

Среднее давление в жидкости повышается до 3 МПа с незначительными колебаниями, связанными с пробегами волн по объему жидкости и радиальными упругими колебаниями оболочки. При заданных параметрах оболочка ведет себя упруго. Среднее окружное напряжение в оболочке (на уровне срединной поверхности) изменяется аналогично среднему давлению в жидкости – зависимость от времени имеет колоколообразную форму.

В трехмерной задаче результаты решения должны соответствовать решению задачи в плоской постановке, если длина груза совпадает с длиной трубы и на обоих торцах ставится условие симметрии. Полученные в результате решения зависимости представлены на рис. 3. На рис. 3а, как и на рис. 2а, приведено среднее значение давления в жидкости. На рис. 3б приведено окружное напряжение в оболочке в зависимости от времени в сечении  $z = 0$  в точке  $x = R, y = 0$  на уровне срединной поверхности. Наличием зазора между ударником и трубопроводом можно объяснить отсутствие возмущений в период времени от 0 до 1 мс. Среднее давление в жидкости и напряжения в оболочке качественно соответствуют решению плоской задачи, но несколько отличаются количественно по амплитуде волн. Длительность импульса по времени также близка к значениям, полученным в плоской постановке. Различия в амплитудах давления и напряжения можно объяснить тем, что в расчетах использовались разные методы решения.

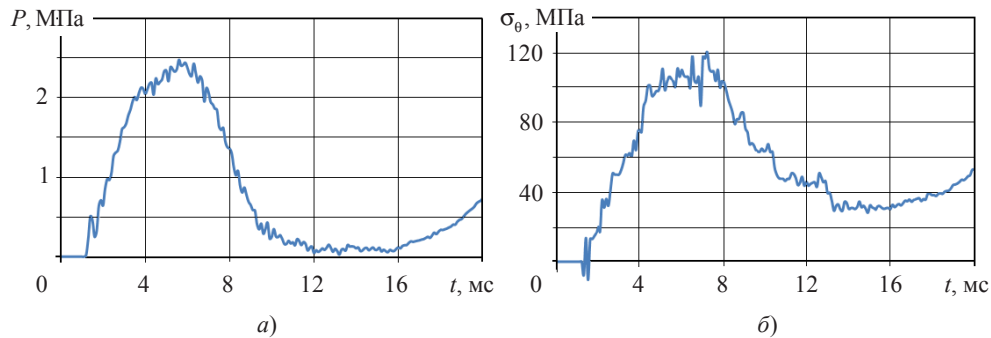


Рис. 3

Для плоской задачи использовался вариационно-разностный метод второго порядка точности, а для пространственной – метод конечных элементов, где каждая ячейка представляет собой восьмиузловой элемент первого порядка точности. Кроме того, при решении пространственной задачи берутся значительно более грубые сетки по сечению:  $128 \times 3$  ячеек по трубе,  $12 \times 3$  ячеек по ударнику и 672 ячейки по жидкости.

### 3. Решение задачи с длинным грузом

Рассмотрим подробнее пространственную задачу для длинного ударника ( $l = 5$  м). Расчет задачи в трехмерной постановке проводится с разбиением трубы с жидкостью по длине на 500 ячеек и по длине ударника на 250 ячеек. В результате ударного воздействия груза трубопровод с жидкостью испытывает большие перемещения в районе зоны контакта с ударником (рис. 4). На рис. 4а показаны вертикальные средние перемещения  $U_y$  в нескольких сечениях трубы. К моменту времени  $t = 15$  мс груз полностью отрывается от трубы. На рис. 4б показано распределение вертикального перемещения по длине груза в момент времени  $t = 20$  мс.

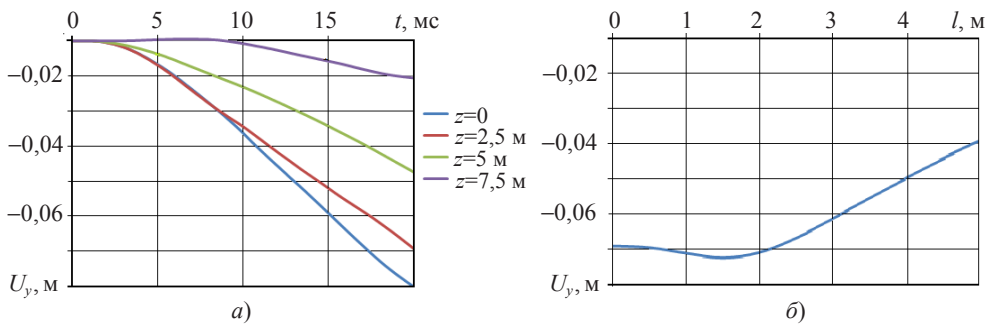


Рис. 4

Несмотря на значительное изменение формы, в процессе соударения груз деформируется упруго, однако в трубной оболочке, помимо упругих деформаций, наблюдаются и пластические деформации в зоне контакта. Максимум пластических деформаций (второй инвариант тензора) наблюдается на границе пятна контакта (торца груза) и составляет 0,03.

Рассмотрим процесс формирования гидроударной волны в продольном направлении. На рис. 5 представлены зависимости изменения от времени среднего давления в жидкости для разных сечений трубы. Формируется гидроударный продоль-

ный импульс в жидкости, слабоменяющийся в сечениях за пределами зоны контакта ( $z > 5$  м). Амплитуда давления вблизи плоскости симметрии задачи  $z = 0$  почти в 1,5 раза превышает амплитуду формирующегося продольного импульса.

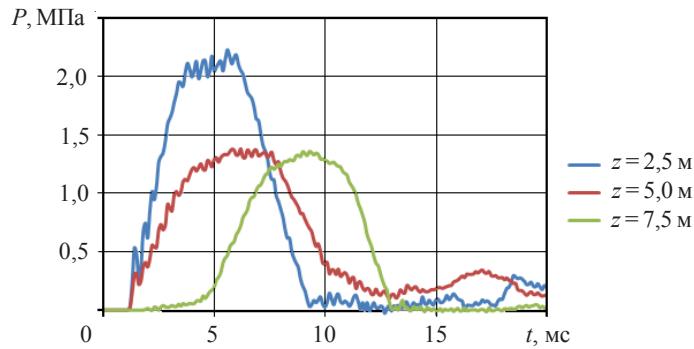


Рис. 5

Определим количественно импульс давления, возникающий при движении жидкости в трубе в продольном направлении. Его можно получить из соотношения

$$I = S \int_0^t P dt. \quad (2)$$

Здесь  $S$  – площадь сечения внутренней поверхности трубы,  $P$  – среднее давление в жидкости. На расстоянии 1 м за грузом по формуле (2) получим значение 1504 Н·с, что составляет ~27% от начального импульса движения ударника. Окружные напряжения в оболочке трубопровода  $\sigma_\theta$  определяются гидроударным импульсом в жидкости. На рис. 6 приведены зависимости окружного напряжения в трубе от времени в различных сечениях по  $z$  в точках  $x = R, y = 0$ .

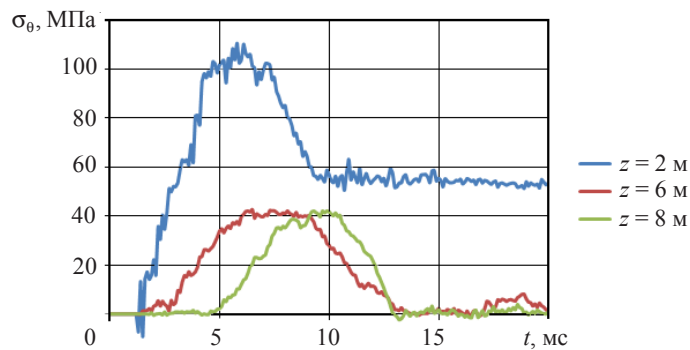


Рис. 6

Как видно из графиков, окружные напряжения на участке трубы под грузом остаются на уровне 55 МПа после удара. Этот факт можно объяснить тем, что в процессе ударного нагружения трубопровод изменяет свою форму, в нем появляются пластические деформации в зоне контакта и в рассматриваемых точках возникают растягивающие напряжения. Продольные напряжения в трубной оболочке  $\sigma_z$  усиливаются по мере прогиба трубы, то есть при осевой ее деформации. На продольные напряжения оказывают большое влияние граничные условия задачи. Давать оценку продольным напряжениям можно только до того момента, пока не придет отраженная от торцевой части трубы волна напряжений. Исходя из длины тру-

бы и плотности ее материала, получим, что отраженная волна придет обратно через 4 мс после удара. На рис. 7 показаны зависимости средних значений продольных напряжений в нескольких сечениях. По величине они намного меньше окружных напряжений в трубной оболочке.

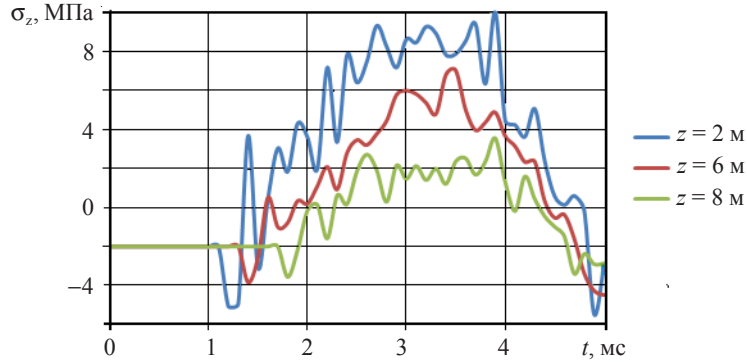


Рис. 7

Груз передает часть своего начального импульса как продольному гидроударному движению, так и поперечному движению трубы с жидкостью под грузом.

#### 4. Решение задачи с коротким грузом

Рассмотрим задачу с коротким грузом ( $l = 1$  м). В этом случае масса ударника недостаточно велика для того, чтобы придать трубопроводу большое смещение относительно начального положения. На рис. 8а показаны вертикальные средние перемещения  $U_y$  в нескольких сечениях трубы. На рис. 8б показано распределение вертикального перемещения по длине груза в момент времени  $t = 20$  мс.

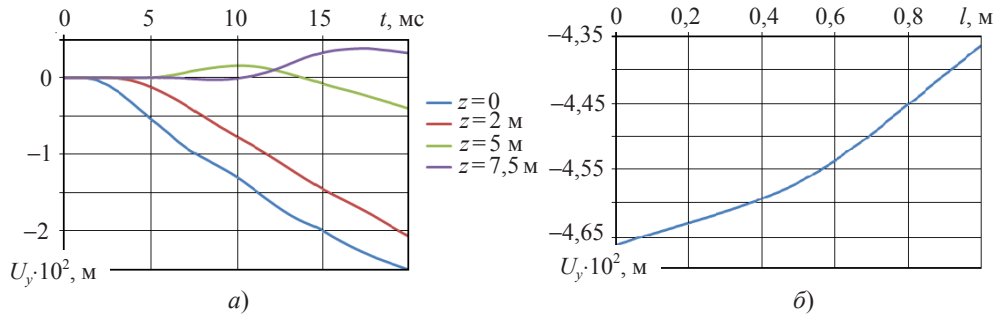


Рис. 8

Как и в рассмотренном выше случае, в процессе удара груз деформируется упруго, а в трубной оболочке наблюдаются пластические деформации в зоне контакта. На рис. 9 представлены зависимости изменения от времени среднего давления в жидкости для разных сечений трубы. Так же, как и в рассмотренной выше задаче с длинным грузом, в жидкости формируется гидроударный продольный импульс, слабоменяющийся в сечениях за пределами зоны контакта ( $z > 1$  м).

Как видно из приведенных графиков, длина волны сформировавшегося гидроударного импульса близка к приведенным ранее результатам для длинного груза. Амплитуда импульса для короткого груза меньше аналогичной амплитуды для длин-

ного груза на 2 МПа. Дадим оценку возникающему продольному импульсу на расстоянии 1 м за грузом. Из формулы (2) получим, что импульс составляет ~88% от начального значения импульса движения ударника, то есть значительно больше, чем для длинного груза.

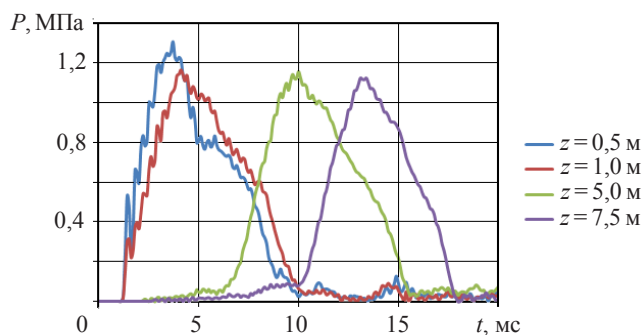


Рис. 9

Окружное напряжение, возникающее в трубной оболочке, приведено на рис. 10. Как и в случае с длинным ударником, на участке трубы под грузом будут формироваться остаточные напряжения после удара. Окружные напряжения в трубной оболочке инициируются внутренним давлением в жидкости. Следовательно, в трубе за пределами зоны контакта также будет формироваться импульс по окружным напряжениям с амплитудой 35 МПа.

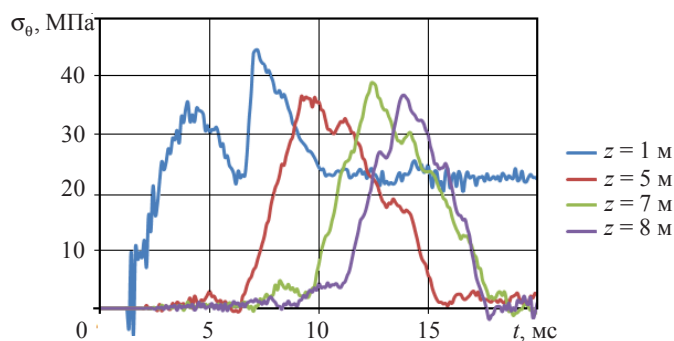


Рис. 10

Продольное напряжение ведет себя аналогично, как и в случае, рассмотренном ранее, только амплитуда возникающего импульса будет в 2,5 раза меньше.

### Заключение

Получены новые численные решения пространственной задачи взаимодействия ударника с упругопластическим трубопроводом, заполненным жидкостью. Показано, что волновые процессы в трубной оболочке и внутренней жидкости имеют сложный взаимосвязанный характер и зависят от граничных условий. Проанализированы особенности протекающих волновых процессов и даны оценки формирующегося продольного импульса. Полученные результаты можно использовать как краевые и начальные условия для расчета протяженных трубопроводных систем при локальном ударном воздействии.

#### Список литературы

1. Shepherd J.E., Inada K. Shock loading and failure of fluid-filled tubular structures. *Dynamic Failure of Materials and Structures*. 2010. P. 153–190.
2. Ando K., Sandada T. Shock propagation through a bubbly liquid in a deformable tube. *J. Fluid Mech.* 2011. V. 671. P. 339–363.
3. Inada K., Shepherd J.E. Flexural waves in fluid-filled tubes subject to axial impact. *J. Pressure Vessel Technol.* 2010. V. 132(2). P. 021302.
4. Зефирова С.В., Кочетков А.В., Мясумов И.А., Савихин А.О. Численное моделирование деформирования трубопровода с жидкостью при ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2011. Вып. 73. С. 113–119.
5. Зефирова С.В., Кочетков А.В., Савихин А.О. Численное моделирование деформирования подводного трубопровода с заполняющей жидкостью при ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 160–166.
6. Зефирова С.В., Кочетков А.В., Овчинников В.Ф., Савихин А.О., Смирнов Л.В., Яскеляин А.В. Численное моделирование динамического деформирования пространственного трубопровода с жидкостью при локальном ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75(2). С. 152–159.
7. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. 2006.
8. Лурье М.В. *Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа*. М.: Нефть и газ, 2003. 335 с.
9. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Кочетков А.В. и др. Пакет прикладных программ «Динамика-2». *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций*. 1987. С. 4–13.

#### References

1. Shepherd J.E., Inada K. Shock loading and failure of fluid-filled tubular structures. *Dynamic Failure of Materials and Structures*. 2010. P. 153–190.
2. Ando K., Sandada T. Shock propagation through a bubbly liquid in a deformable tube. *J. Fluid Mech.* 2011. V. 671. P. 339–363.
3. Inada K., Shepherd J.E. Flexural waves in fluid-filled tubes subject to axial impact. *J. Pressure Vessel Technol.* 2010. V. 132(2). P. 021302.
4. Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Myasumov I.A., Savikhin A.O. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya truboprovoda s zhidkost'yu pri udarnom nagruzhenii. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2011. Vyp. 73. S. 113–119.
5. Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Savikhin A.O. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya podvodnogo truboprovoda s zapolnyayushchey zhidkost'yu pri udarnom nagruzhenii. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2012. Vyp. 74. S. 160–166.
6. Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Ovchinnikov V.F., Savikhin A.O., Smirnov L.V., Yaskelyain A.V. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo deformirovaniya prostranstvennogo truboprovoda s zhidkost'yu pri lokal'nom udarnom nagruzhenii. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2013. Vyp. 75(2). S. 152–159.
7. Hallquist J.O. *LS-DYNA Theory Manual*. 2006.
8. Lur'ye M.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefi, nefteproduktov i gaza*. M.: Neft' i gaz, 2003. 335 s.
9. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V. i dr. Paket prikladnykh programm «Dinamika-2». *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Issledovanie i optimizatsiya konstruktsey*. 1987. S. 4–13.



**NUMERICALLY MODELING HYDROELASTOPLASTIC DEFORMATION  
OF A PIPELINE WITH A LIQUID UNDER IMPACT LOADING**

**Kochetkov A.V., Poverennov E.Yu., Savikhin A.O.**

*Research Institute of Mechanics of State University of Nizhni Novgorod,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The formulation of the problem and the results of numerically investigating the spatial process of a dynamic interaction between a striker and a pipeline carrying a liquid are presented. The processes of transformation of the motion of the striker, the pipeline shell and the liquid into a longitudinal hydro shock wave are analyzed. The specific features of the wave processes in the pipeline are shown; deformations in the pipe wall, the amplitude and the length of the longitudinal wave in the liquid and in the pipe shell are analyzed, as well as the effect of the boundary conditions. The part of the pulse transforming into a longitudinal hydro shock wave is evaluated.

*Keywords:* pipeline, fluid, hydroelasticity, plasticity, deformation, impact.