

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА С ЗАПОЛНЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ^{*)}

© 2012 г. С.В. Зефирова, А.В. Кочетков, А.О. Савихин

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

zefirov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 01.03.2012

Описываются математическая модель и методика численного решения плоской задачи динамического взаимодействия ударника с подводным трубопроводом, содержащим жидкость. Показаны особенности волновых процессов для трубопровода, погруженного в жидкость, и для трубопровода без окружающей среды.

Ключевые слова: трубопровод, упругость, пластичность, деформация, удар, жидкость.

Исследование процессов деформации подводных трубопроводов при ударном нагружении представляет интерес в связи с применением в нефтегазовой сфере. Для предотвращения аварийных ситуаций, таких как утечка нефтепродуктов, возникает необходимость оценки прочности труб под воздействием импульсных нагрузок. Ранее [1–3] были получены результаты численного моделирования ударного воздействия тела, имеющего форму вытянутого прямоугольного параллелепипеда, на свободный участок трубопровода, заполненного жидкостью, без учета внешней среды. В результате проведенных исследований было установлено, что наличие заполняющей жидкости существенно увеличивает контактные нагрузки на трубопровод, но снижает среднее значение скорости его движения и уровень окружного напряжения в нем.

Постановка задачи взаимодействия ударника с оболочкой трубопровода, заполненного жидкостью, представлена на рис. 1. Предполагается, что происходит ударное воздействие на участок трубопровода, полностью погруженный в жидкость.

Математическая формулировка данной задачи включает в себя уравнения деформирования оболочки трубопровода, уравнения движения ударника, окружающей и заполняющей жидкости. Ударное воздействие вызывает сложную волновую картину деформации поперечного сечения трубной оболочки на участке ее контакта с ударником.

^{*)}Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант №11-08-97040-р_поволжье_а), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 16.740.11.0087).

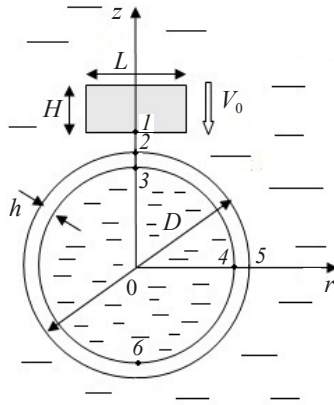


Рис. 1

Для решения этой проблемы требуется моделирование различных волновых процессов, нелинейных и взаимосвязанных между собой. Это перемещения и деформации в оболочке трубопровода, контактное взаимодействие трубной оболочки с ударником, со сжимаемой внутренней и внешней жидкостью. Положение контактных поверхностей заранее неизвестно и должно определяться в ходе решения задачи. Полагается, что в меридиональном сечении сплошная среда занимает область Ω , ограниченную контуром G , которую всегда можно разбить на односвязные подобласти:

$$\Omega = \bigcup_j \Omega_j, \quad G = \bigcup_j G_j, \quad j = \overline{1, D}. \quad (1)$$

Движение среды описывается в переменных Лагранжа уравнениями, следующими из вариационного принципа Даламбера – Лагранжа в форме Журдена, в неподвижной декартовой r, z системе координат:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} (\sigma_{rr} \delta \dot{e}_{rr} + \sigma_{zz} \delta \dot{e}_{zz} + 2\sigma_{rz} \delta \dot{e}_{rz}) d\Omega + \iint_{\Omega} \rho (\ddot{u}_r \delta u_r + \ddot{u}_z \delta u_z) d\Omega - \\ & - \int_G (p_r \delta \dot{u}_r + p_z \delta \dot{u}_z) dS - \int_G (q_r \delta \dot{u}_r + q_z \delta \dot{u}_z) dS = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}$ – компоненты тензора напряжений Коши и скоростей деформаций, \dot{u}_α – скорости перемещений; p_α, q_α – компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления ($\alpha = r, z$). Учет геометрической нелинейности осуществляется поэтапной перестройкой конфигурации сеточной модели во времени. Связь тензора скоростей деформаций со скоростями перемещений определяется в метрике текущего состояния:

$$\dot{e}_{rr} = \dot{u}_{r,r}, \quad \dot{e}_{zz} = \dot{u}_{z,z}, \quad \dot{e}_{rz} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{z,r} + \dot{u}_{r,z}). \quad (3)$$

Для описания упругопластических свойств материалов применялась теория течения с комбинированным кинематическим и изотропным упрочнением. Полагается, что скорость деформации \dot{e}_{ij} можно представить в виде суммы скоростей упругих \dot{e}_{ij}^y и пластических \dot{e}_{ij}^p составляющих:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^y + \dot{e}_{ij}^p. \quad (4)$$

Связь между скоростью девиатора напряжений $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \delta_{ij}\dot{\sigma}$ и скоростью упругих составляющих девиатора деформаций $\dot{e}'_{ij} = \dot{e}_{ij} - \delta_{ij}\dot{e} - \dot{e}_{ij}^p$ определяется в виде:

$$D_j \sigma'_{ij} = 2G \dot{e}'_{ij}, \quad D_j \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \dot{\omega}_{ik} \sigma'_{kj} - \dot{\omega}_{jk} \sigma'_{ik}, \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i}), \quad (5)$$

где D_j – производная Яуманна, G – модуль сдвига, δ_{ij} – символ Кронекера. Связь между скоростью шаровых составляющих напряжений $\dot{\sigma}$ и деформаций \dot{e} полагается линейной:

$$\dot{\sigma} = 3K\dot{e}, \quad \dot{\sigma} = \frac{1}{3}\dot{\sigma}_{ii}, \quad \dot{e} = \frac{1}{3}\dot{e}_{ii}, \quad \dot{e}_{ii}^p = 0, \quad (6)$$

где K – модуль объемного сжатия. Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девиаторов напряжений область упругих состояний, принимается в форме Мизеса. Скорость пластических составляющих деформации определяется ассоциированным законом течения:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ij}^p &= \lambda s_{ij}, \quad s_{ij} s_{ij} = \frac{2}{3} C(\kappa)^2, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma - \rho_{ij}, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}, \\ \dot{\rho}_{ij} &= 2g \dot{e}_{ij}^p, \quad g = g(J_{2\rho}), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad J_{2\rho} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\rho_{ij} \rho_{ij}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $C = C(\kappa)$ ($\kappa = \sqrt{2/3} \int_0^t \sqrt{\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p} dt$ – параметр Одквиста) – радиус поверхности текучести; ρ_{ij} – тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести; g – модуль анизотропного упрочнения, который в первом приближении можно принять в виде [4]:

$$g = g_0 - (g_0 - g) \text{sign}(\rho_{ij} s_{ij}), \quad g = g(J_{2\rho}), \quad g_0 = g(J_{2\rho} = 0). \quad (8)$$

Параметр λ тождественно равен нулю при упругом деформировании и определяется при пластическом деформировании из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки.

В вариационном уравнении движения (2) компоненты контактного усилия q_α ($\alpha = r, z$) заранее неизвестны и определяются в процессе решения задачи [5]. Для простоты полагается, что контактное взаимодействие возможно только между отдельными конструктивными элементами, которые занимают в меридиональном сечении или на плоскости rOz односвязные подобласти Ω_j , ограниченные контурами G_j . На контактных границах (G_j) вводится местный координатный базис s, ξ , связанный с деформированной поверхностью. Здесь s – направление касательной, ξ – направление нормали к поверхности. Для определения сил контактного взаимодействия используются симметричные алгоритмы контакта на несогласованных разностных сетках, обеспечивающие непроникание по нормали и проскальзывание вдоль касательной без учета и с учетом трения [5]. Для алгоритма контакта без трения усилие по нормали определяется из условия непроникания:

$$\begin{cases} \dot{u}'_\xi = \dot{u}''_\xi, \\ q'_\xi = -q''_\xi, \end{cases} \quad q_\xi = q'_\xi = \begin{cases} 0, & q_\xi \geq 0, \\ q_\xi, & q_\xi < 0, \end{cases} \quad (9)$$

касательные усилия полагаются равными нулю $q'_s = q''_s = 0$. Для модели контакта с трением усилие по нормали определяется из того же условия непроникания; касательные усилия определяются из условия отсутствия проскальзывания:

тельное усилие определяется на первом этапе из условия жесткой склейки, а в случае превышения силы трения покоя – в соответствии с законом Кулона:

$$\begin{cases} \dot{u}'_s = \dot{u}''_s, \\ q'_s = -q''_s, \end{cases} \quad q_s = q'_s = \begin{cases} q_s, & |q_s| \leq k_\xi |q_\xi|, \\ k_\xi |q_\xi| \text{sign}(q_s), & |q_s| > k_\xi |q_\xi|. \end{cases} \quad (10)$$

Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т.е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт. Поэтому условия (9), (10) применяются только для сжимающих усилий.

В настоящей работе численное моделирование задач осуществляется в плоской постановке на основе вариационно-разностного метода, реализованного в пакете прикладных программ (ППП) «Динамика-2» [6, 7]. Решение определяющей системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях производится по явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест». Пространственные производные аппроксимируются, исходя из дивергентной схемы аппроксимации производных, в предположении линейного изменения вдоль каждой из сторон четырехугольной элементарной ячейки. Перемещения и скорости перемещений определяются в узлах разностной сетки, а тензоры напряжений и скоростей деформаций – в центрах ячеек.

Фрагмент расчетной области контактного взаимодействия ударника с трубопроводом и жидкостью приведен на рис. 2.

Размеры внешней области задаются порядка десяти радиусов трубопровода. Они выбраны так, чтобы возмущения в окружающей жидкости не исказили решение в окрестности трубопровода. В силу симметрии задачи приведена половина сечения трубы. Расчетная область поделена на пять частей: ударник, трубная оболочка, заполняющая жидкость и две области окружающей жидкости. Окружающая жидкость рассматривалась в виде двух областей для удобства построения расчетной сетки и аппроксимации условий контакта областей. В рассмотрение не бралась область окружающей жидкости над ударником, а также небольшая область внешней жидкости между ударником и трубной оболочкой.

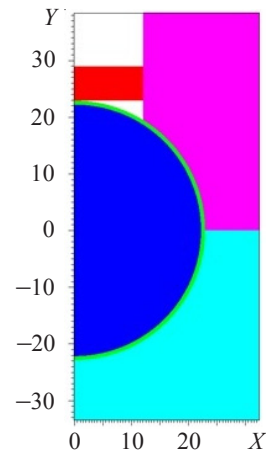


Рис. 2

Такое упрощение модели объясняется сложностью расчетов в указанных областях вследствие вытеснения жидкости из-под ударника и в целом на процесс установления квазистатического напряженного состояния это не повлияет. Тело-ударник имеет начальную скорость $V_0 = 10$ м/с. Оболочка трубопровода и ударник выполнены из стали с параметрами $K = 1,7 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0,77 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 200$ МПа, модуль упрочнения $g = 149$ МПа, $\rho = 7800$ кг/м³. Погонная масса ударника равна 772 г/см, трубы – 1123 г/см. Параметры груза: $L = 24$ см, $H = 6$ см, параметры трубы: $R_{cp} = 22,5$ см, $h = 0,7$ см. Параметры расчетной сетки: груз $48 \times 24 = 1152$ ячеек, труба $300 \times 3 = 900$ ячеек, заполняющая жидкость $75 \times 75 \times 6 = 33750$ ячеек, окружающая жидкость $75 \times 253 \times 2 + (75 \times 253 + 22 \times 253) = 626886$ ячеек.

Предполагалось, что жидкость как внутри, так и снаружи трубопровода описывается теми же уравнениями, что и упругопластическая среда с объемным модулем

$K = 2250$ МПа и малым сдвиговым модулем $G \approx 0,1$ МПа, $\rho = 1000$ кг/м³, погонная масса жидкости – 1541,3 г/см.

Результаты расчетов средних по сечению значений величин скорости V_z , перемещения U_z , давления внутренней жидкости P и окружного напряжения S в зависимости от времени для трубопровода с учетом окружающей жидкости и без нее приведены на рис. 3–5. Результаты численного решения для трубопровода, окруженного жидкостью, показаны на рисунках кривыми с буквой «а», для трубопровода без внешней жидкости – кривыми с буквой «б» соответственно. Цифры в обозначениях графиков соответствуют номерам точек трубной оболочки и груза, приведенным на рис. 1.

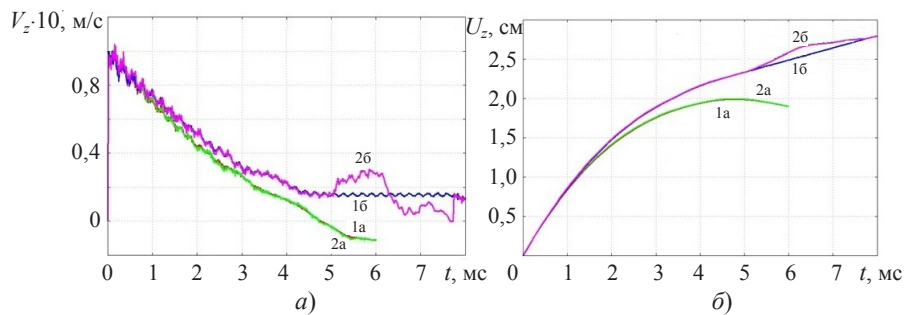


Рис. 3

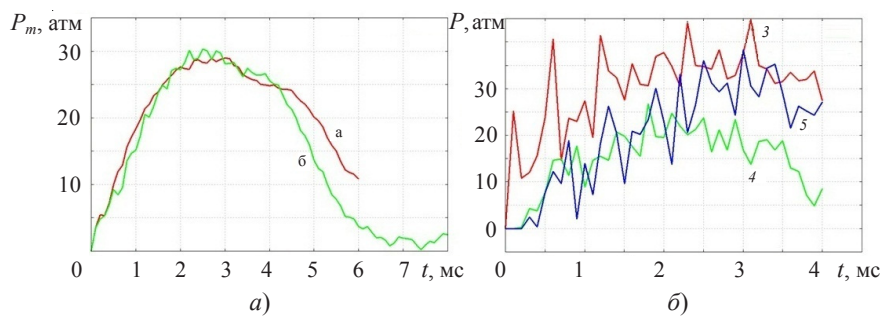


Рис. 4

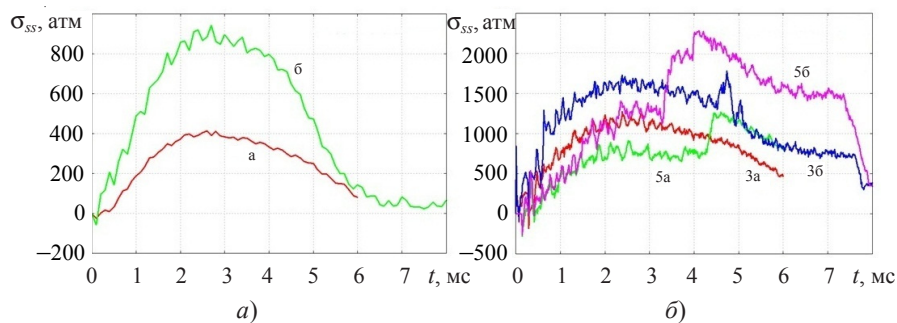


Рис. 5

На рис. 3а, 3б приведены графики скорости V_z и перемещения U_z груза и верхней точки трубы как с учетом окружающей жидкости, так и без нее. Видно, как происходит отрыв груза от оболочки за счет упругих сил. Вследствие демпфирующего влияния окружающей жидкости снижается скорость и уменьшается величина

перемещения груза и трубопровода в отличие от варианта без внешней среды. Среднее значение давления P_m внутренней жидкости (рис. 4а) для трубопровода, окруженного жидкостью, по величине практически такое же, как значение давления без учета внешней среды. Давление в точках трубной оболочки (рис. 4б) как локальная характеристика имеет колебательный характер. Наличие окружающей жидкости существенно снижает значение окружного напряжения в трубной оболочке, что наглядно видно на рис. 5. Осредненные значения окружного напряжения σ_{ss} и значения окружного напряжения в точках трубной оболочки приведены на рис. 5а и 5б соответственно. Таким образом, наличие внешней среды существенно изменяет все характеристики движения и деформирования трубопровода при его взаимодействии с ударником, что необходимо учитывать при прогнозировании его динамического поведения.

Закключение

В результате проведенных численных исследований установлено, что наличие окружающей жидкости существенно снижает результирующую гидродинамическую нагрузку на трубопровод (разность между внутренним и внешним давлением), среднее значение его скорости движения и уровень окружного напряжения в нем. Волновые процессы в трубной оболочке и внутренней жидкости имеют сложный характер, возникают эффекты отрыва и кавитации в жидкости. Получены зависимости от времени средних кинематических и динамических параметров в трубной оболочке и жидкости, которые могут быть использованы в качестве начальных и граничных условий для расчета динамики пространственной подводной трубопроводной системы в целом при локальном ударном воздействии.

Список литературы

1. 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.
2. Корюкин Д.Б., Котов В.Л., Кочетков А.В. Моделирование соударения подземного трубопровода с пластиной в плоской постановке // Вестник ННГУ. Сер. Механика. 2000. Вып. 2. С. 82–86.
3. О математическом моделировании поражения многониточного газопровода осколками от взрыва одной из ниток / В.Г. Баженов, В.В. Егунов, А.И. Кибец и др. // Итоги и перспективы десятилетнего сотрудничества Минатома РФ и ОАО «Газпром»: Тр. научно-практ. конф. 2000. Ч. I. С. 148–153.
4. Коротких Ю.Г., Маковкин Г.А. О моделировании процессов непропорционального упругопластического деформирования на базе уравнений пластичности с комбинированным упрочнением // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1997. С. 5–10.
5. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Цветкова И.Н. Численное моделирование задач нестационарного контактного взаимодействия деформируемых конструкций // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1995. Вып. 52. С. 154–160.
6. 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. 1988. С. 66–73.
7. 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. 1987. С. 4–13.

**NUMERICALLY MODELING THE DEFORMATION
OF AN UNDERWATER PIPELINE CONTAINING FLUID
UNDER IMPACT LOADING**

S.V. Zefirov, A.V. Kochetkov, A.O. Savikhin

A mathematical model and a method for numerically solving a two-dimensional problem of interaction between a striker and an underwater pipeline containing liquid are described. Also, some peculiarities of the wave processes for a pipeline submerged in liquid and a pipe having no environment are presented.

Keywords: pipeline, elasticity, plasticity, deformation, impact, liquid.