УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДА С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ*)

С.В. Зефиров, А.В. Кочетков, И.А. Мясумов, А.О. Савихин

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

Представлены математическая модель и методика численного решения плоской задачи динамического взаимодействия ударника с трубопроводом, содержащим и не содержащим жидкость. Показаны особенности волновых процессов для безопорного участка трубопровода и для трубопровода, опирающегося на неподвижную плоскую поверхность. Анализируется влияние заполняющей жидкости.

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

Исследование процессов деформации трубопроводов при ударном нагружении представляет интерес в связи с широким кругом приложений в нефтегазовой сфере, атомной промышленности и строительстве. Для предотвращения аварийных ситуаций, например утечки нефтепродуктов или теплоносителя в атомной энергетике, необходимо оценить прочность труб под воздействием импульсных нагрузок.

Вопросам динамического деформирования трубопроводов при ударных нагрузках посвящен ряд научных статей, например [1–3], однако влияние заполняющей жидкости в них учитывается не полностью либо не учитывается совсем. Математическая формулировка данной задачи должна включать уравнения деформирования оболочки трубопровода, уравнения движения ударника и заполняющей жидкости. Ударное воздействие вызывает сложную волновую картину деформации поперечного сечения трубной оболочки на участке её контакта с ударником, вынужденное движение заполняющей трубопровод сжимаемой жидкости, контактное взаимодействие с опорной поверхностью (если она имеется). Решение этой проблемы требует моделирования сложных нелинейных и взаимосвязанных между собой физических процессов, учета больших перемещений и необратимых деформаций в оболочке трубопровода, контактного взаимодействия трубной оболочки с ударником, сжимаемой внутренней жидкостью и опорной поверхностью, эффектов отрыва сред друг от друга и повторного их соударения. Дело осложняется также тем, что поло-

---

*) Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-4807.2010.8), а также при поддержке РФФИ (проект 11-08-97040-р_поволжье_а).

жение контактных поверхностей заранее неизвестно и должно определяться в ходе решения задачи.

В настоящей работе численное моделирование задач осуществляется в плоской постановке на основе вариационно-разностного метода, реализованного в пакете прикладных программ (ППП) «Динамика-2» [4, 5]. Принимается, что в меридиональном сечении сплошная среда занимает область Ω, ограниченную контуром G, которую всегда можно разбить на односвязные подобласти:

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

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

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

Здесь σ_{ij}, $\dot{e}_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений Коши и скоростей деформаций, $\dot{u}_\alpha$ – скорости перемещений; p_α, q_α – компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления ($\alpha = r, z$), ρ – плотность среды.

Учет геометрической нелинейности осуществляется поэтапной перестройкой конфигурации сеточной модели во времени. Связь компонент тензора скоростей деформаций со скоростями перемещений определяется в метрике текущего состояния:

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

Для описания упругопластических свойств материалов применяется теория течения с линейным кинематическим упрочнением. Полагается, что скорость деформации $\dot{e}_{ij}$ можно представить в виде суммы скоростей упругой $\dot{e}_{ij}^{y}$ и пластической $\dot{e}_{ij}^{p}$ составляющих:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^{y} + \dot{e}_{ij}^{p}. \tag{4}$$

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

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

где D_J – производная Яуманна, G – модуль сдвига, δ_{ij} – символ Кронекера.

Связь между скоростями шаровых составляющих тензоров напряжений $\dot{\sigma}$ и деформаций $\dot{e}$ полагается линейной:

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

где K – модуль объемного сжатия.

Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девиаторов напряжений область упругих состояний, принимается в форме Мизеса. Скорости пластических составляющих деформации определяются ассоциированным законом течения:

$$\dot{e}_{ij}^{p} = \dot{\lambda} s_{ij}, \quad s_{ij}s_{ij} = \frac{2}{3}C(\kappa)^2, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma - \rho_{ij}, \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}, \quad \dot{\rho}_{ij} = 2g\dot{e}_{ij}^{p},$$

$$g = g(J_{2\rho}), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij}dt, \quad J_{2\rho} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\rho_{ij}\rho_{ij}}. \tag{7}$$

Здесь $C = C(\kappa)$ – радиус поверхности текучести ($\kappa = \sqrt{2/3}\int_0^t \sqrt{\dot{e}_{ij}^{p}\dot{e}_{ij}^{p}}\,dt$ – параметр Одквиста); ρ_{ij} – тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести; g – модуль анизотропного упрочнения, который в первом приближении можно принять в виде [6]:

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

Параметр $\dot{\lambda}$ равен нулю при упругом деформировании и определяется из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки при пластическом деформировании.

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.

В вариационном уравнении движения (2) компоненты контактного усилия q_α ($\alpha = r, z$) заранее неизвестны и определяются в процессе решения задачи [7]. 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: 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 [7]. Для алгоритма контакта без трения усилие по нормали определяется из условия непроникания:

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

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

$$\begin{cases} \dot{u}'_\xi = \dot{u}''_\xi, \\ q'_\xi = -q''_\xi, \end{cases} \quad q_\xi = q'_\xi = \begin{cases} 0, & q_\xi \ge 0, \\ q_\xi, & q_\xi < 0, \end{cases} \tag{10}$$

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

$$\begin{cases} \dot{u}_s' = \dot{u}_s'', \\ q_s' = -q_s'', \end{cases} \quad q_s = q_s' = \begin{cases} q_s, & |q_s| \le k_\xi |q_\xi|, \\ k_\xi |q_\xi| \operatorname{sign}(q_s), & |q_s| > k_\xi |q_\xi|. \end{cases} \tag{11}$$

Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т.е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление их в контакт. Поэтому условия (9)–(11) применяются только для сжимающих усилий.

Задача соударения тела, имеющего форму протяженного прямоугольного параллелепипеда, с оболочкой трубопровода без внутренней жидкости рассматривалась в двух вариантах (рис. 1). Первый вариант расчетов (см. рис. 1,*а*) предполагал ударное воздействие на свободный (безопорный) участок трубопровода. Во втором варианте (см. рис. 1,*б*) предполагалось, что трубопровод опирается на неподвижную жесткую плоскую поверхность.

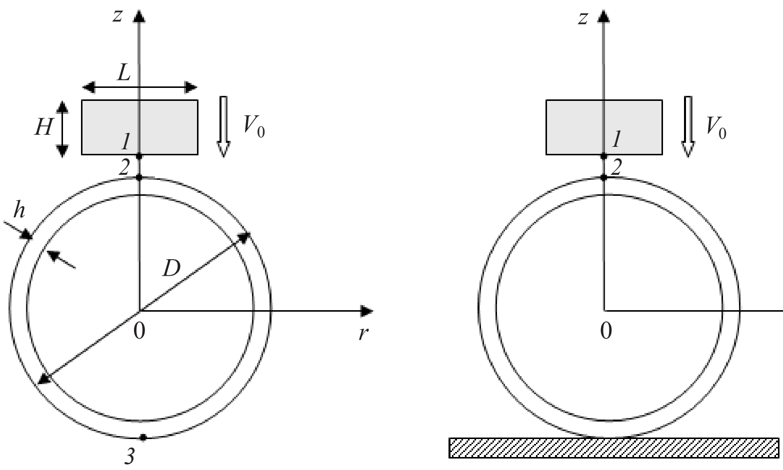


Рис. 1

Тело-ударник имеет начальную скорость V_0 = 10 м/с. Геометрические размеры ударника и трубопровода: L = 24 см, H = 6 см, D = 45,7 см, h = 0,7 см. Оболочка трубопровода и ударник выполнены из стали с параметрами $K = 1{,}7\cdot10^5$ МПа, $G = 0{,}77\cdot10^5$ МПа, предел текучести σ_T = 200 МПа, модуль упрочнения g = 140 МПа, ρ = 7800 кг/м^3. Погонная масса ударника – 772 г/см, трубы – 1123 г/см. Расчеты проводились на сетке из 300×3 ячеек по сечению трубы и 48×24 ячеек по ударнику.

Постановка задачи численного моделирования ударного взаимодействия тела с трубопроводом, заполненным жидкостью (водой), также соответствует рис. 1, только предполагается, что полость трубопровода содержит сжимаемую среду, описываемую теми же уравнениями, что и упругопластическая среда с объемным модулем K = 2250 МПа и малым сдвиговым модулем $G \approx 0{,}1$ МПа, ρ = 1000 кг/м^3, погонная масса жидкости – 1541,3 г/см. Внутренняя полость трубы покрывалась сеткой из 34000 четырехугольных ячеек. Параметры по ударнику и оболочке были те же, что и в предыдущей задаче.

На рис. 2 показаны деформированные формы оболочки трубопровода в различные моменты времени (время измеряется в мс), полученные для варианта трубопровода без жидкости, опирающегося на неподвижную плоскую поверхность. В силу симметрии задачи приведена половина сечения трубы.

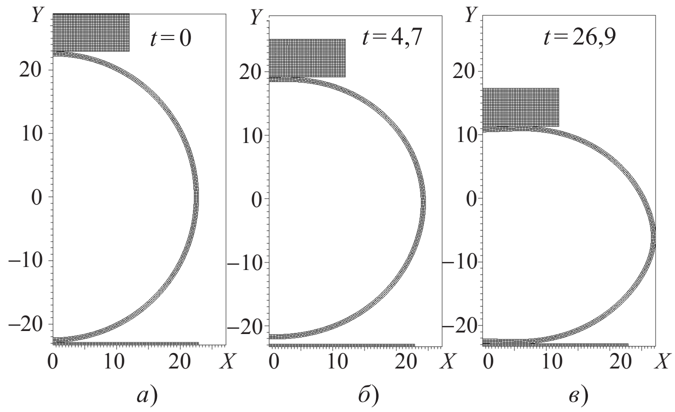


Рис. 2

Значения средних по сечению величин скорости v_z и перемещения u_z в зависимости от времени для трубопровода с внутренней жидкостью и без нее, изображают соответственно кривые *1* и *2* на рис. 3. При этом рис. 3,*а*, *б* относятся к свободному трубопроводу, рис. 3,*в*, *г* – к трубопроводу, опирающемуся на плоскую поверхность. В варианте оболочки, опертой на неподвижную плоскую поверхность, наблюдается более интенсивное деформирование трубной оболочки, причем на контактных поверхностях и в боковой области оболочки изгибные напряжения вызывают пластическое течение.

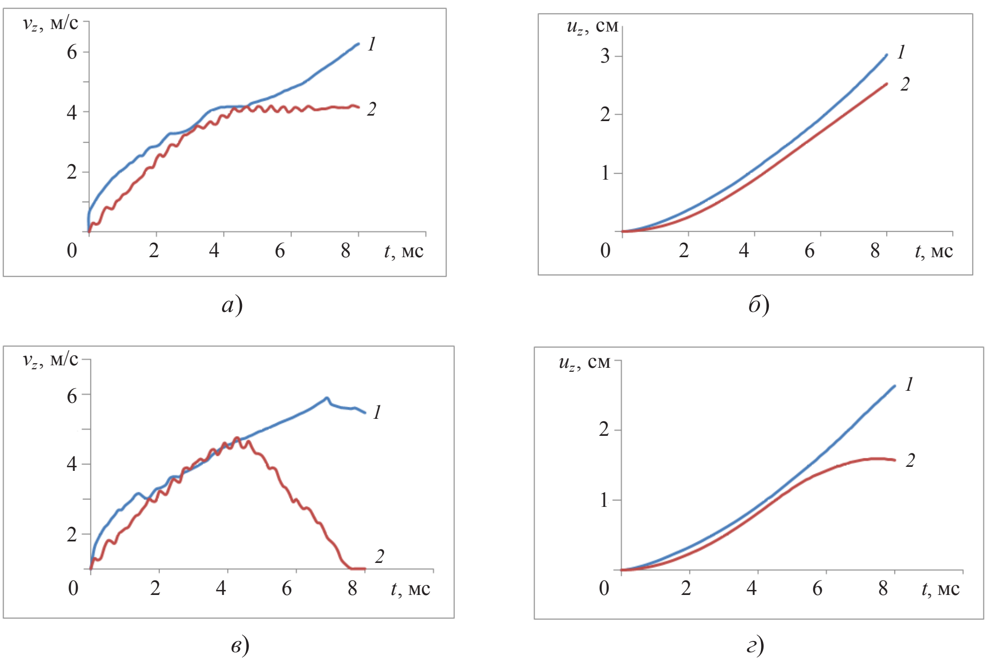
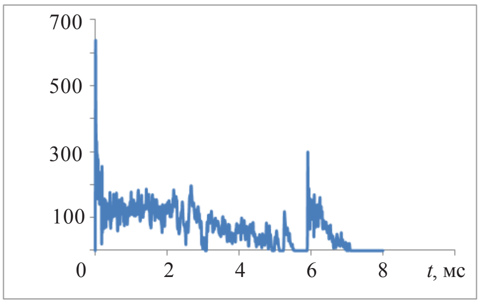
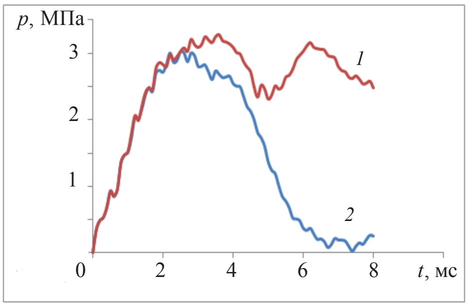


Рис. 3

На рис. 4,*а* приведен график контактной силы, вызываемой действием на оболочку груза, в зависимости от времени. Трубопровод с жидкостью в рассматриваемый интервал времени неоднократно отскакивает от опоры. Волновые процессы в жидкости носят сложный характер, в частности, в некоторые моменты времени формируются зоны отрыва жидкости от внутренней поверхности оболочки. Графики среднего давления в жидкости для случаев оболочки, опертой на неподвижную плоскую поверхность, и безопорной оболочки приведены на рис. 4,*б* под номерами *1* и *2* соответственно.



а)



б)

Рис. 4

Как видно из графиков, среднее давление в жидкости для случая оболочки, опертой на неподвижную плоскую поверхность, не падает так сильно, как для безопорного трубопровода, а совершает колебания около уровня ≈ 2,7 МПа. Таким образом, как наличие опоры, так и внутренняя жидкость в трубе существенным образом изменяют все характеристики движения и деформирования трубопровода при взаимодействии с ударником, что необходимо учитывать при прогнозировании его динамического поведения.

Заключение

В результате проведенных численных исследований установлено, что наличие жидкости существенно увеличивает контактные нагрузки на трубопровод, но снижает среднее значение скорости его движения и уровень окружного напряжения в нем. Волновые процессы в трубной оболочке и внутренней жидкости носят сложный характер, возникают пластические деформации изгиба в трубе, эффекты отрыва и кавитации в жидкости. Моделирование ударного воздействия на трубопровод, опирающийся на неподвижную плоскую поверхность, показало большое изменение всех кинематических и динамических характеристик процессов ударного нагружения в отличие от неопертого (свободного) трубопровода. 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 трубопроводной системы в целом.

Литература

1. *Баженов, В.Г.* Численное моделирование деформирования газопровода высокого давления при соударении с фрагментами разрушенных труб / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, А.В. Кочетков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – №1. – С. 106–110.

2. *Котов, В.А.* Моделирование соударения подземного трубопровода с пластиной в плоской постановке / В.А. Котов, Д.Г. Корюхин, А.В. Кочетков // Вестник ННГУ. Сер. Механика. – 2000. – Вып. 2. – С. 67–73.

3. О математическом моделировании поражения многониточного газопровода осколками от взрыва одной из ниток / В.Г. Баженов [и др.] // Итоги и перспективы десятилетнего сотрудничества Минатома РФ и ОАО «Газпром»: Тр. научно-практ. конф. – М., 2000. – Ч. I. – С. 148–153.

4. *Баженов, В.Г.* О численной реализации вариационно-разностной моментной схемы решения нелинейных задач динамики нетонких оболочек при импульсном воздействии / В.Г. Баженов, С.В. Зефиров, А.И. Кибец // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т. 1988. – С. 66–73.

5. Пакет прикладных программ «Динамика-2» / В.Г. Баженов [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т. – 1987. – С. 4–13.

6. *Коротких, Ю.Г.* О моделировании процессов непропорционального упругопластического деформирования на базе уравнений пластичности с комбинированным упрочнением / Ю.Г. Коротких, Г.А. Маковкин // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 1997. – С. 5–10.

7. *Баженов, В.Г.* Численное моделирование задач нестационарного контактного взаимодействия деформируемых конструкций / В.Г. Баженов, С.В. Зефиров, И.Н. Цветкова // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 1995. – С. 154–160.

[13.10.2011]

NUMERICAL MODELING OF THE PIPELINE WITH LIQUID DEFORMATION UNDER THE IMPACT LOADING

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

The mathematical model and the numerical analysis procedure of a plane dynamic interaction problem for a striker and a pipeline with and without liquid are described. Some particular features of wave processes are shown for a free of support section of a pipeline and for a pipeline supported on a fixed flat surface. The influence of a filling up liquid is analyzed.

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