

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА UPSGOD*

© 2013 г. **М.Х. Абузьяров, С.В. Крылов, Е.В. Цветкова**

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

abouziar@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 05.04.2012

Проведено тестирование программного комплекса UPSGOD на задачах упругопластического взаимодействия. Решены задача ударного взаимодействия пластикового контейнера, заполненного водой, с жесткой преградой и задача о внутреннем взрывном нагружении оболочки, заполненной жидкостью. Приведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными и расчетными данными.

Ключевые слова: взаимодействие, контактные силы, упругопластическое деформирование, модель, детонация, контейнер.

Введение

Процессы динамического взаимодействия жидкостей с различными физическими телами широко распространены в природе и технике. В результате этих явлений возможны деформации физических объектов, нарушение их физических свойств и даже разрушение. Для анализа такого рода явлений необходимо изучение процессов, возникающих как в жидкостях, так и в твердых телах, а также при их контактных взаимодействиях. Основную трудность в моделировании таких задач представляют существенная нелинейность происходящих процессов, сложные связанные волновые взаимодействия жидкости с окружающими ее телами, сопровождающиеся образованием кавитации и упругопластическим деформированием [1].

В настоящей статье приведено решение двух задач взаимодействия жидкости с деформируемыми телами при внутреннем взрывном и ударном нагружениях с помощью программного комплекса UPSGOD. Как и во всех задачах ударного и взрывного взаимодействия, здесь заранее неизвестны ни силы контактного взаимодействия, ни формы и площади поверхностей контактирующих сред. Существенным отличием, послужившим основой для выбора именно этих тестовых задач, стала длительность периода нагружения деформируемых элементов конструкций. При падении пластикового контейнера характер гидроупругого взаимодействия близок

* Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант №11-08-97040-р_поволжье_а) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

к квазистатическому, поскольку основное нагружение стенок осуществляется за счет водяного гидротока. При взрывном упругопластическом взаимодействии оболочки с жидкостью нагрузки имеют ярко выраженный кратковременный импульсный характер.

Краткая математическая формулировка

Программный комплекс UPSGOD предназначен для решения в связанной постановке двумерных плоских и осесимметричных задач нестационарного упругопластического деформирования конструкций при контактном взаимодействии и соударении с заполняющими и окружающими средами с учетом существенных формоизменений контактирующих поверхностей. Отличительной особенностью данного комплекса от широко известных отечественных и зарубежных программных средств (таких, например, как «Дракон», «Логос», «Динамика-2», «Динамика-3», Autodyn, LS-Dyna и др.) является единый подход к интегрированию уравнений движения жидких и твердых деформируемых сред, основанный на модифицированной схеме Годунова второго порядка точности.

Полная система уравнений, моделирующая описываемые процессы, состоит из уравнений движения сплошной среды и условий, обеспечивающих связность задачи взаимодействия.

В эйлеровой системе координат roz (декартовой или цилиндрической с осью симметрии oz) система уравнений, описывающая нестационарное упругопластическое деформирование сплошной среды без вязкости и без учета теплопроводности, имеет вид [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial r} \bar{f} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{g} = \bar{h}, \quad (1)$$

где

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ s_{rr} \\ s_{zz} \\ s_{rz} \end{bmatrix}, \quad \bar{f} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - s_{rr} \\ \rho v u - s_{rz} \\ (e + p - s_{rr})u - s_{rz}v \\ u(s_{rr} - 4\mu/3) \\ u(s_{zz} + 2\mu/3) \\ u(s_{rz} - \mu v) \end{bmatrix}, \quad \bar{g} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v - s_{rz} \\ \rho v^2 + p - s_{zz} \\ (e + p - s_{zz})v - s_{rz}u \\ v(s_{rr} + 2\mu/3) \\ v(s_{zz} - 4\mu/3) \\ v(s_{rz} - \mu u) \end{bmatrix},$$

$$\bar{h} = \begin{bmatrix} -k\rho u/r \\ (k/r)(2s_{rr} + s_{zz} - \rho u^2) \\ (k/r)(s_{rz} - \rho v u) \\ (k/r)((s_{rr} - e - p)u + s_{rz}v) \\ s_{rr} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + s_{rz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \lambda s_{rr} - v \frac{2\mu u}{3r} \\ s_{zz} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + s_{rz} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \lambda s_{zz} - v \frac{2\mu u}{3r} \\ -\frac{1}{2} s_{rr} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{2} s_{zz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r} \right) + s_{rz} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \lambda s_{rz} \end{bmatrix},$$

$$e = \rho \left(\varepsilon + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right).$$

Система (1) замыкается уравнением состояния (УРС) в форме

$$\varepsilon = \varepsilon(p, \rho). \quad (2)$$

Здесь и далее p – давление; ρ – плотность; u, v – компоненты скорости, зависящие от r и z ; ε – внутренняя энергия единицы массы; e – полная механическая энергия единицы объема сплошной среды; s_{rr}, s_{rz}, s_{zz} – компоненты девиатора тензора истинных напряжений Эйлера; μ – модуль сдвига; k – параметр, равный 0 для плоской двумерной задачи и 1 – для осесимметричной.

Первые четыре уравнения в (1) – это законы сохранения массы, импульса и энергии. Следующие три – физические соотношения упругости и пластичности с учетом поворота тензора напряжений, записанные в дифференциальной форме. Критерием перехода из упругого состояния в пластическое служит условие текучести Мизеса:

$$(s_{rr}^2 + s_{rz}^2 + s_{zz}^2 + s_{rr}s_{zz}) \geq \frac{1}{3} \sigma_s^2, \quad (3)$$

где σ_s – предел текучести материала при одноосном растяжении–сжатии. Для моделирования пластического поведения материала применяется метод расщепления по физическим процессам, предложенный В.Н. Кукуджановым для интегрирования уравнений упругопластических сред релаксационного типа [3]. В программной реализации UPSGOD решение из [3], полученное для линейного упрочнения, было обобщено на случай произвольной нелинейной диаграммы деформирования.

В случае моделирования баротропных процессов, характерных для широкого класса задач динамики упругопластических сред, вместо УРС в форме (2) рассматривается УРС в форме

$$p = p(\rho), \quad (4)$$

и уравнение сохранения энергии исключается из (1).

Численное интегрирование уравнений движения осуществляется по явной схеме С.К. Годунова первого порядка точности [4, 5] и модифицированной схеме [6, 7], имеющей второй порядок точности на гладких решениях и монотонное поведение на разрывах.

К системе уравнений (1) и (2) добавляются начальные и краевые условия, которые делятся на кинематические, динамические и смешанные [8]. Эти условия задаются в общем случае на различных участках внешней границы области определения задачи.

Условия на поверхностях контакта сред с различными физико-механическими свойствами учитывают отрыв, проскальзывание, трение, прилипание. Они формулируются как комбинация условий непроникания (или прилипания) на тех участках поверхностей, которые находятся в данный момент в контакте, и условий на свободных границах на остальных участках. Критерием перехода от условий непроникания к условию на свободной границе (отрыв) служит неравенство $q < q_k$, где q – контактное давление, q_k – некоторая константа, характеризующая прочность на отрыв. В частности, для рассматриваемых здесь жидкостей $q_k = 0$. Критерием вступления в контакт является геометрическое пересечение свободных поверхнос-

тей тел. Численная реализация данных условий основывается на выделении и сопровождении в процессе расчетов поверхностей взаимодействующих сред. Контактные силы определяются решением соответствующих соотношений динамической совместности на волнах в контактирующих средах. Разработаны эффективные алгоритмы, реализующие контактные условия (в том числе, когда взаимодействующие поверхности аппроксимируются сетками с несовпадающими узлами) для задач соударения деформируемых тел и взаимодействия тел с жидкостью. В этих алгоритмах используется точное решение задачи о распаде произвольного разрыва между жидкостью и упругим телом. Для повышения эффективности расчетов применяется разношаговая схема интегрирования во времени законов сохранения в подобластях с различными физико-механическими свойствами.

Падение пластикового контейнера, заполненного водой, на жесткую поверхность

В работе [9] приведены экспериментальные данные и результаты численного моделирования удара цилиндрического пластикового контейнера, заполненного водой, о жесткую поверхность.

В эксперименте контейнер высотой 16 см, диаметром 8,4 см, с толщиной стенок 0,15 см, заполненный водой на 12,5 см, падает с высоты 0,4 м на жесткое основание. Скорость соударения составляет 2,8 м/с. Физико-механические характеристики материалов: пластик – модуль Юнга $E = 1,3$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$, плотность $\rho = 948$ кг/м³; вода – плотность $\rho_0 = 998,2$ кг/м³. В статье приведены зависимости деформаций, возникающих в контейнере, от времени на расстояниях 2,5 и 8 см от дна.

В настоящей работе проведено решение этой задачи программным комплексом UPSGOD в постановке, аналогичной [9]. Физико-механические свойства контейнера соответствовали экспериментальным данным, а свойства воды определялись по уравнению состояния вида:

$$p = B[(\rho/\rho_0)^\chi - 1],$$

где параметры имели значения: $\chi = 7,14$, $B = 304,5$ МПа.

Подобласть жидкости покрывалась сеткой из 40×100 ячеек, подобласть контейнера – 4×200 ячеек. В расчетах, аналогично [9], задавались следующие граничные условия: верхний и боковой края пластиковой оболочки не закреплены, на нижней границе – нулевое значение вертикальной скорости. На свободной поверхности жидкости выполнялось условие свободного истока (равенство нулю градиентов всех искомых функций: плотности, скорости, давления), на оси симметрии и на нижней границе воды – условие «жесткой стенки» (равенство нулю нормальной составляющей скорости).

Сравнение экспериментальных данных, результатов численных расчетов [9], полученных с помощью интерполяционной комбинации метода конечных объемов (для описания течения жидкости) и метода конечных элементов (для упругой оболочки), а также численных значений, полученных авторами при решении задачи, представлено на рис. 1 и 2. Рисунки иллюстрируют изменение окружных деформаций контейнера во времени (в мс) на расстояниях 2,5 см и 8 см от дна контейнера соответственно.

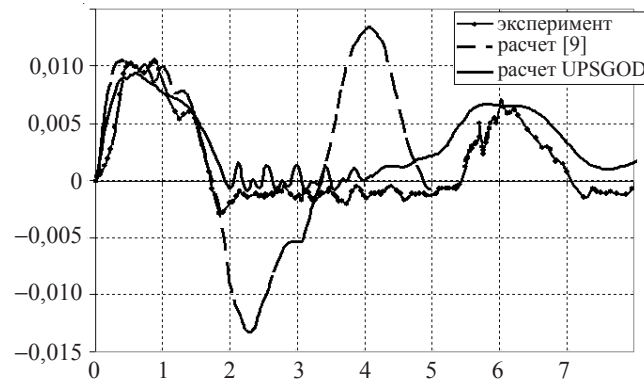


Рис. 1

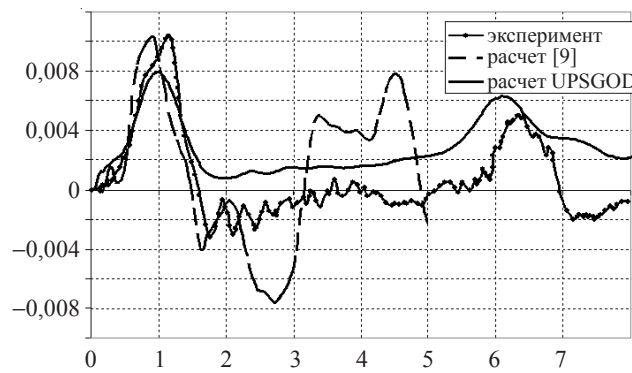


Рис. 2

Более качественное и количественное соответствие численных данных эксперименту наблюдается в случае применения программного кода UPSGOD.

Внутреннее взрывное нагружение цилиндрической оболочки, заполненной жидкостью

Экспериментальное изучение процессов взрывного нагружения алюминиевой трубы, заполненной водой, проводилось авторами работ [10, 11]. Схема эксперимента изображена на рис. 3. Заряд взрывчатого вещества (ВВ) массой 2,8 г и начальной плотностью $\rho_{\text{ВВ}} = 1,77 \text{ г/см}^3$ вместе с детонатором массой 0,2 г размещался на оси симметрии трубы с водой в центральном ее сечении. Длина вертикально расположенной алюминиевой трубы $L = 22,86 \text{ см}$, внешний диаметр $D = 10,1 \text{ см}$, толщина стенки $h = 0,635 \text{ см}$. Нижнее основание трубы лежит на твердом пластиковом основании, верхние края могут свободно перемещаться. В экспериментах [10, 11] измерялись гидродинамические нагрузки, действующие на внутреннюю стенку трубы в центральном ее сечении, а также скорости и амплитуды перемещения наружной стенки трубы в этом же сечении в зависимости от времени.

Расчетная схема эксперимента представлена на рис. 4. В силу осевой симметрии численное решение строится в области $r \geq 0$, где r – радиальная компонента цилиндрической системы координат, z – ось симметрии. В качестве модели детонации ВВ общей массой $m_{\text{ВВ}} = 3 \text{ г}$ в численных расчетах применяется модель мгновенной безволновой детонации [11]. Согласно данной модели, в сферической полости, образовавшейся в жидкости после мгновенной детонации ВВ, давление рас-

считывается по формуле $p = A_1 \rho^n + A_2 \rho^\gamma$, где A_1, A_2, n, γ – заданные константы, ρ – текущая плотность продуктов детонации (ПД): $\rho = m_{\text{ВВ}} / V_{\text{ПД}}(t)$ ($V_{\text{ПД}}(t)$ – текущий объем ПД). В начальный момент времени $V_{\text{ПД}}(0) = 4\pi \cdot r_{\text{ВВ}}^3 / 3$, где $r_{\text{ВВ}} = 0,74$ см – начальный радиус ВВ. Константы в расчетах в соответствии с [12] имели следующие значения: $A_1 = 20159,3$; $A_2 = 3405,2$; $n = 3,12$; $\gamma = 1,25$.

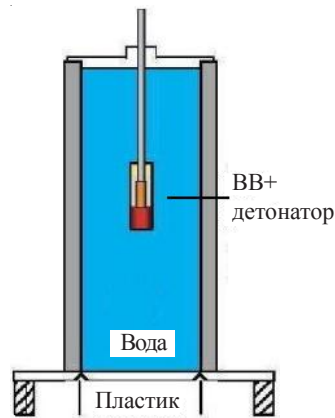


Рис. 3

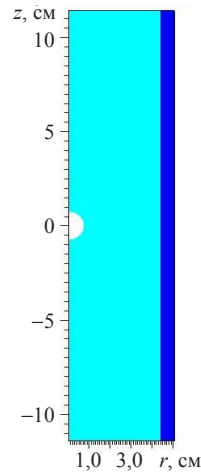


Рис. 4

В качестве уравнения состояния воды использовалось двучленное уравнение [4] с константами $\rho_0 = 1$ г/см³, $B = 3045$ бар, $\chi = 7,15$ и скорость звука $C_0 = 1460$ м/с. Упругопластическое поведение алюминиевой трубы рассчитывалось с использованием следующих механических характеристик: плотность $\rho_{\text{Al}} = 2,7$ г/см³, модуль упругости $E = 7,38 \cdot 10^5$ бар, коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$, предел текучести $\sigma_T = 3000$ бар, $1/3$ модуля упрочнения $g = 3500$ бар. За пределами упругости поведение материала описывалось соотношениями теории пластичности с линейным изотропным упрочнением.

Результаты сопоставления численных и экспериментальных данных представлены на рис. 5–7, где соответственно изображены зависимости давления p (в барах), скорости v (в м/с) и перемещения r (в см) стенки трубы в центральном ее сечении от времени (в мс). На рисунках сплошной линией отмечены данные эксперимента, а линией с маркерами – результаты численного расчета.

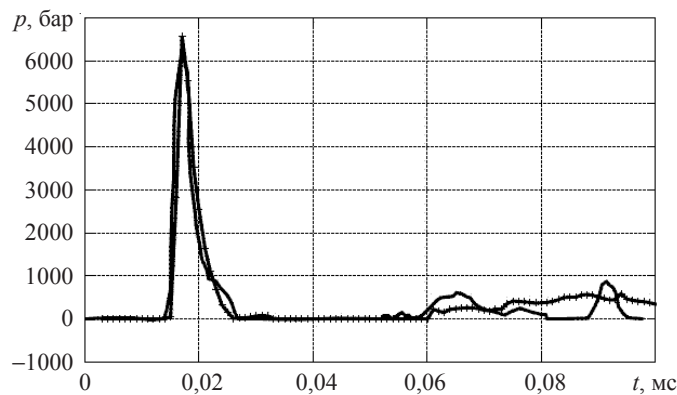


Рис. 5

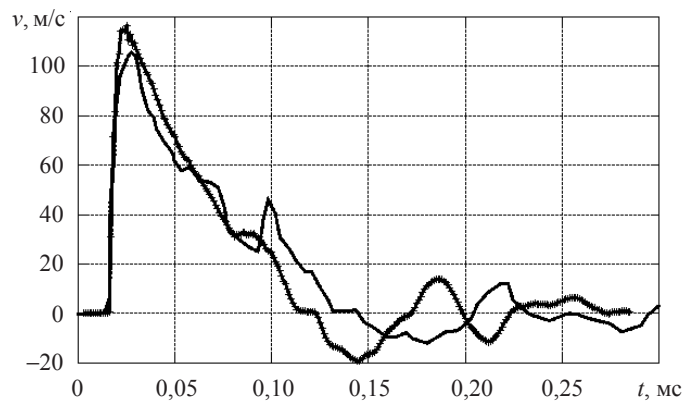


Рис. 6

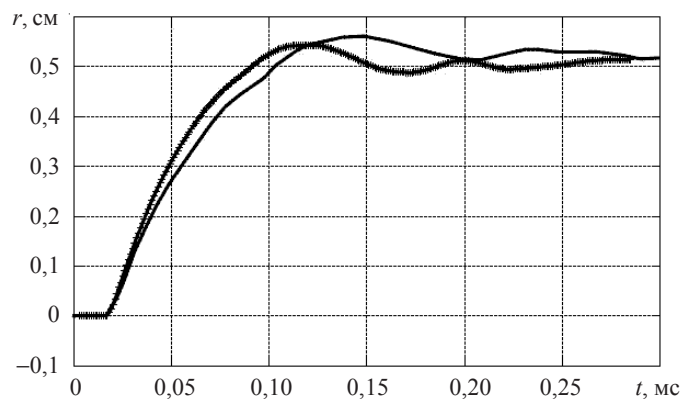


Рис. 7

Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что пакет программ UPSGOD является надежным вычислительным средством для решения в связанной постановке двумерных задач динамики сплошных сред при импульсном (взрывном или ударном) нагружении, контактном взаимодействии и соударении с заполняющими и окружающими сжимаемыми средами с учетом значительных формоизменений контактирующих поверхностей. Наблюдаются достоверные результаты при решении задач с интенсивными взаимодействиями (взрыв в трубе с жидкостью). Результаты расчета слабоинтенсивных ударных воздействий, возникающих при падении пластикового контейнера с небольшой высоты, более достоверны, чем расчеты авторов эксперимента, полученные с помощью других программных продуктов.

Список литературы

1. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газонепроницаемыми преградами / М.Х. Абузяров, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.И. Романов, М.А. Сырунин // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2010. Вып. 72. С. 120–129.
2. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред / М.Х. Абузяров, В.Г. Баженов, В.Л. Котов и др. // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40, №6. С. 940–953.

3. Кукуджанов В.Н. Метод расщепления упругопластических уравнений // МТТ. 2004. №1. С. 98–108.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Демидов В.Н., Корнеев А.И. Численный метод расчета упругопластических течений с использованием подвижных разностных сеток. Томск, 1983. Деп. в ВИНТИ 1983, № 2924-83.
6. Abouziarov M., Aiso H., Takahashi T. An application of conservative scheme to structure problems // Series from Research Institute of Mathematics of Kyoto University. Mathematical Analysis in Fluid and Gas Dynamics. 2004. № 1353. P. 192–201.
7. Абузаров М. О повышении точности метода С.К. Годунова для решения задач динамики газа и жидкости // Труды 13 конф. молодых ученых Московского физико-технич. ин-та. М.: Изд-во МФТИ, 1988. Т. 2. С. 30–37.
8. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.
9. Karac A., Ivankovic A. Drop impact of fluid-filled plastic containers: Finite volume method for coupled fluid-structure-fracture problems // WCCM V Fifth World Congress on Computational Mechanics / Eds. H.A. Mang, F.G. Rammerstorfer, J. Eberhardsteiner. Vienna, Austria. July 7–12, 2002. P. 1–10.
10. Sandusky H., Chambers G., Zerilli F. Dynamic measurements of plastic deformation in a water-filled aluminum tube in response to detonation of a small explosives charge // Shock and Vibration. 1999. P. 125–132.
11. Chambers G., Sandusky H., Zerilli F. Pressure measurements on a deforming surface in response to an underwater explosion in a water-filled aluminum tube // Shock and Vibration. 2001. P. 1–7.
12. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.Л. Орленко, К.П. Станюкович и др. М.: Наука, 1975. 704 с.

THE SIMULATION OF THE HYDRO-ELASTOPLASTIC INTERACTION USING THE UPSGOD CODES

M.K. Abouziarov, S.V. Krylov, E.V. Tsvetkova

The UPSGOD computer codes were tested on problems of elastoplastic interaction. The problems of impact interaction of a liquid-filled plastic container with a rigid obstacle and of the internal explosive loading of a liquid-filled shell are solved. The obtained results are compared with the available experimental and numerical data.

Keywords: interaction, contact forces, elastic-plastic deformation, model, detonation, container.