

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ОБЪЕМНОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИИ В ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКЕ ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА

© А. В. Острик, *Е.А. Ромадинова

Институт проблем химической физики, г. Черноголовка
* Московский физико-технический институт, г. Москва

Предлагается физическая модель для расчета волновых процессов при объемном выделении энергии в элементарной ячейке гетерогенного материала с дисперсным наполнителем. В реализующем ее численном коде используется неявная полностью консервативная конечно-разностная схема, позволяющая осуществлять выход на стационарное решение. Решение систем алгебраических уравнений, получающихся после линеаризации методом Ньютона исходных уравнений в конечно-разностном виде, осуществляется методом матричной прогонки с выбором главного элемента по столбцу. Приводятся результаты расчетов для гетерогенного материала, состоящего из эпоксидного связующего и наполнителя из диоксида олова или стеклянных микросфер, покрытых вольфрамом. Проводится сравнение полученных данных с результатами, следующими из модели квазистатического установления давления.

WAVE PROCESSES AFTER NON - EQUILIBRIUM VOLUME ENERGY EMISSION IN ELEMENTARY CELL OF HETEROGENEOUS MATERIAL

*A.V. Ostrik, *E.A. Romadinova*

Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka
*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

The physical model is proposed for calculation wave processes under volume energy expansion in elementary cell of heterogeneous material with dispersion filler. In numerical code we use implicit full-conservative finite-difference scheme, that let to realize stationary solution. The solution of algebraic equations that are obtained after linearization of original equations in finite-difference form by Newton method is made by method of matrix running with main element choice by column. The results of calculation for heterogeneous material that consists of epoxy binder and filler of dioxide tin or glass microsphere covered by tungsten are given here. There is the comparison for the data we obtained and the results that followed from the quasi-static model.

При воздействии рентгеновского излучения (РИ) наносекундной длительности на конденсированные преграды в них развиваются интенсивные волновые процессы, исследование которых представляет практический интерес [1-4]. Физическая картина формирования механического действия излучения существенно зависит от энергии квантов E_{ph} , определяющей характерный размер области поглощения РИ, и, следовательно, плотность поглощенной энергии [2, 3]. Область объемного энерговыделения при поглощения жесткого РИ ($10\text{кэВ} < E_{ph} \leq 100\text{кэВ}$) может составлять сантиметры и более. При этом сравнительно невысокий уровень разогрева не приводит к интенсивным газодинамическим процессам, но требует детального учета гетерогенной структуры материала, наличия двухфазных состояний, пористости компонент, сопротивления связующего на сдвиг и других особенностей [4], которые в случае более высокой плотности поглощенной энергии, характерной для воздействия мягкого РИ, несущественны.

1. Физическая модель. Волновые процессы в преграде формируются в результате термомеханического действия излучения, физической причиной которого является расширение компонентов гетерогенного материала (ГМ) при нагреве, сдерживаемое его инертностью. Если длительность импульса излучения мала по сравнению со временем акустической релаксации

зоны объемного энерговыделения (для наносекундного излучения и достаточно жесткого РИ это условие, как правило, выполняется), то механическое действие излучения рассматривается поэтапно [5]. На первом этапе происходит установление давления в элементарной ячейке ГМ постоянного объема, поскольку волновое движение во всей области энерговыделения ещё не успевает развиваться. Второй этап соответствует стадии волновых процессов и разрушений во всем ГМ в целом. В настоящей работе предлагается численная модель волновых процессов в ячейке на первом этапе. Когда время акустической релаксации каждой из компонент ГМ много меньше времени энерговыделения (длительности воздействия РИ), то процесс выравнивания давления в ячейке считается квазистатическим и волновым движением пренебрегается [6]. Однако для крупных включений наполнителя ГМ и коротких воздействующих импульсов РИ давление в ячейке не успевает выравниваться по мере подвода энергии, что приводит к интенсивным волновым процессам. Распространяющиеся по ячейке волны перераспределяют энергию между компонентами ГМ и в результате после их затухания давление в ячейке может отличаться от полученного в квазистатическом приближении.

Рассматривается ГМ с дисперсным наполнителем, элементарная ячейка которого состоит из сферического включения, окруженного связующим (массовые содержания наполнителя в ячейке и ГМ совпадают). Граница ячейки также считается сферической. При воздействии жесткого РИ характерные размеры включений наполнителя значительно меньше толщины зоны энерговыделения, что позволяет считать каждую из компонент равномерно прогретой в пределах ячейки и задавать пространственное распределение энерговыделения в ней единственным параметром – долей энергии поглощенной наполнителем. Как показано в [5], влияние сдвиговых напряжений на начальный профиль давления невелико и волны в ячейке можно описывать в гидродинамическом приближении. Таким образом, задача сводится к решению системы одномерных уравнений газовой динамики в сферической системе координат для многослойной ячейки. Поскольку объемная плотность энерговыделения может быть достаточно высокой [3], то при численном решении этой системы для описания фазовых переходов в компонентах ГМ необходимо использование широкодиапазонных уравнений состояния (УРС).

В качестве граничного условия принимается требование несжимаемости ячейки (равенство нулю радиального перемещения на ее внешней поверхности). В случае полого микросферического наполнителя [7] численное моделирование волновых процессов в его тонких слоях представляется затруднительным. Для упрощения задачи поведение микросферы моделируется динамическим деформированием тонкой многослойной упругой оболочки. На границе между наполнителем и оболочкой требуется равенство радиальных перемещений и давлений.

2. Численный код. При численной реализации нестационарной модели элементарной ячейки ГМ используется неявная полностью консервативная схема [8] для одномерных уравнений газовой динамики в лагранжевых переменных. Неявность применяемой схемы обеспечивает возможность выхода численного решения на стационарный режим для сравнения получаемых результатов с расчетами по квазистатическим моделям. Решение на каждом временном шаге систем алгебраических уравнений с трехдиагональными матрицами, получающихся после линеаризации методом Ньютона исходных уравнений в конечно-разностном виде, осуществляется методом матричной прогонки с выбором главного элемента по столбцу [9], которая теоретически корректна для любой определенной системы уравнений (в отличие от обычной прогонки не требует выполнения практического критерия «диагонального преобладания»). Поскольку конечно-разностные уравнения записываются в матричном виде, то переход от одной системы уравнений (физической модели) к другой достаточно прост и заключается только в смене расчетных формул коэффициентов матриц и их порядка. Тип системы уравнений также не сказывается на эффективности предлагаемого неявного конечно-разностного метода решения.

Как показывает численный эксперимент, высокая устойчивость метода обеспечивает корректный расчет даже такого затруднительного для конечно-разностных методов теста, как автомодельная задача о схождении к центру и отражению от него сферической волны [8] (результаты сравнения численного и аналитического решения в автомодельных переменных (u, s) представлены на рис. 1). Код адаптирован к использованию широкодиапазонных полуэмпирических УРС типа [10] и апробирован на них. Вне области двухфазности этот УРС удовлетворяет известным условиям нормальности вещества по Бете-Вейлю. В случае попадания парамет-

ров вещества в область двухфазности в рамках кода обеспечивается предварительная корректировка УРС[11].

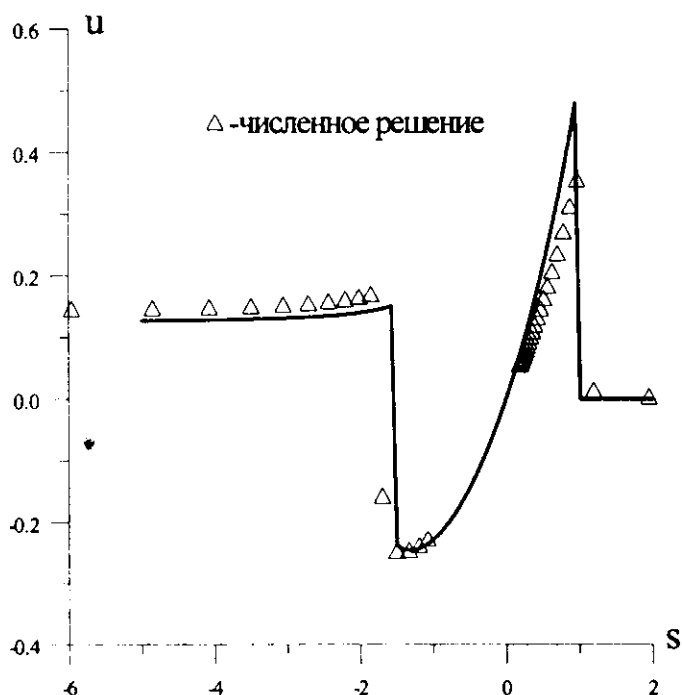


Рис.1. Сравнение с автомодельным решением.

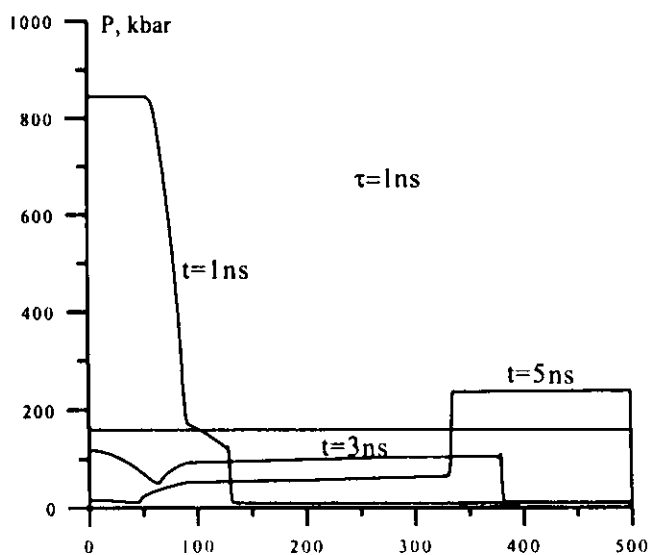


Рис.2. Распространение волн сжатия (1ns).

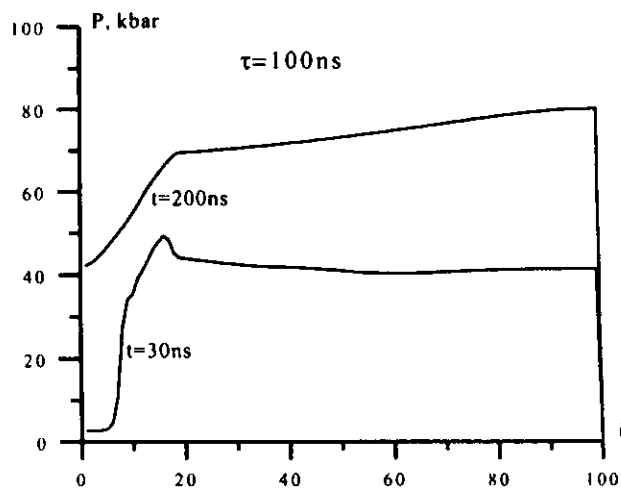


Рис.3. Распространение волн сжатия (100ns).

3. Результаты расчетов. В численных исследованиях рассматривался ГМ [5], который состоит из эпоксидно-полиамидной композиции (связующего), обладающей высокой температурной стойкостью, и диоксида олова SnO_2 (дисперсного наполнителя), хорошо поглощающего излучение. Поведение компонентов этого ГМ описывалось интерполяционным уравнением состояния [10], в котором давление и удельная внутренняя энергия представляются суммами холодных и тепловых составляющих с учетом уменьшения коэффициента Грюнайзена при увеличении удельного объема и температуры. На рис. 2, 3 показан процесс распространения волн сжатия в элементарной ячейке при удельном энерговыделении в ГМ $Q = 10 \text{ кДж/г}$ и поглощае-

мой наполнителем доли энергии равной $\epsilon_f = 0,8$ (I-номер ячейки). Размер включений наполнителя и его массовое содержание принимались равными $a=10$ мкм и $X_f=20\%$. Видно, что при длительности облучения $\tau=1$ нс процесс установления давления носит нестационарный характер и распределение давления в ячейке может существенно отличаться от своего квазистатического значения, показанного на рисунке прямой.

Однако в случае времени подвода энергии $\tau=100$ нс, превышающем более чем на порядок характерные времена распространения акустических возмущений в ячейке (в рассматриваемой ячейке они составляют около 2 нс для наполнителя и 9 нс для связующего), различие становится незначительным и оценка профиля давления по толщине ГМ может проводиться по квазистатической модели [6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабовский Е.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С., Лебедев М.Е., Острик А.В., Фортон В.Е. Генерация мощных ударных волн мягким рентгеновским излучением плазмы Z-пинча // Письма в ЖЭТФ, 1994, т.60, вып.1, с.3-6.
2. Лоборев В.М., Острик А.В., Петровский В.П., Чепрунов А.А. Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции. Научно-технический сборник №1. – Сергиев Посад. ЦФТИ МО РФ, 1997, 75с
3. Грибанов В.М., Острик А.В., Слободчиков С.С. Тепловое и механическое действие рентгеновского излучения на материалы и преграды. Монография. Физика ядерного взрыва: В 2-х т. Том 2. Действие взрыва. –М.: МО РФ ЦФТИ, 1997, 256с.
4. K.S. Kolesnikov, A.V.Ostrik, V.N. Bakulin Numerical simulation for wave processes under X-ray action on heterogeneous material // Dynamics of Multiphase systems, Proceedings of International Conference on Multiphase Systems, held of occasion of the 60th Birthday of Academician Robert Nigmatulin, June 15-17, 2000, Ufa, Bashkortostan, RUSSIA, p. 359-364.
5. Острик А.В., Острик Е.А. Расчет давления при воздействии рентгеновского излучения на гетерогенный материал с пластическим связующим // Межотраслевой научно-технический журнал "Конструкции из композиционных материалов", 1999, вып.2, с.26-32.
6. Острик А.В., Острик Е.А. Численная модель квазистатического выравнивания давления в гетерогенном материале при воздействии на него излучения. / X Юбилейная международная конференция «Вычислительная механика и современные прикладные программные системы. Тезисы докладов.–Переславль-Залесский, 1999, с. 209-210.
7. Острик Е.А. Модель установления давления при импульсном объемном энерговыделении в гетерогенном материале с полидисперсным наполнителем /XVI Международная конференция «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество». Сборник трудов. Терскол, 2001, с.30-32.
8. Волчинская М. И., Гольдин В.Я., Калиткин Н.Н., Самарский А.А.. Сравнение разностных схем на тестах. Препринт №44. – М.: ИПМ, 1972, 20с.
9. Шаракшанэ А.А. Матричная прогонка с выбором главного элемента. Препринт №187. – М.: ИПМ, 1986, 24с.
10. Сапожников А.Т., Першина А.В. Интерполяционное уравнение состояния в области испарения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1984, вып.2(16), с. 29-34.
11. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния в математических моделях механики и физики // Сборник научных трудов "Экстремальные состояния вещества" под редакцией чл. кор. АН СССР В.Е. Фортова, к.ф.-м.н. Е.А. Кузьменкова. –М.: ИВТАН, 1991, с. 3-38.