

УДК 519.6

Математическое моделирование процесса детонации в трехмерном пространстве на адаптивно-встраиваемой лагранжевой сетке в методике Д

В статье описывается методика расчета трехмерных задач газовой динамики на адаптивно-встраиваемых лагранжевых сетках. Основная идея решения уравнений газодинамики с использованием таких сеток заключается в уменьшении размеров ячеек исходной расчетной сетки в процессе счета в локальных зонах с большими градиентами газодинамических переменных. Данный подход позволяет повысить точность численного решения, не перегружая при этом расчет избыточно мелкой сеткой и делая его более экономичным. Приводятся результаты численного моделирования эксперимента по определению влияния слабых ударных волн на распространение детонационной волны с использованием предложенных алгоритмов.

**Л. А. Андреевских, И. М. Епишков,
Н. В. Корепова, Д. М. Линник,
О. О. Муругова, В. Б. Титова,
Ю. Д. Чернышев**

Введение

Численные исследования показывают, что адаптивно-встраиваемые сетки могут существенно увеличивать точность и экономичность вычислительных алгоритмов. Идея использования таких сеток не является новой. Достаточно большой обзор методов, использующих адаптивно-встраиваемую сетку, дается в работе [1]. Кроме того, во ВНИИЭФ также накоплен опыт использования подобных сеток [2, 3].

Основная идея численных методов решения уравнений газодинамики с использованием адаптивно-встраиваемых сеток состоит в уменьшении размеров ячеек в локальных зонах с большими градиентами газодинамических переменных. Такой подход позволяет в ряде случаев значительно повысить точность численного решения и сделать расчет более экономичным.

Методика расчета на адаптивно-встраиваемых сетках за счет своей экономичности особенно актуальна для задач в трехмерной постановке и, в частности, для численного моделирования горения взрывчатых веществ (ВВ) с использованием модели кинетики детонации Морозова–Карпенко (МК) [4]. При использовании данной модели неизбежно возникают высокие требования к размеру ячеек счетной сетки, что отчасти связано с физическими параметрами применяемого

взрывчатого состава. Например, для ВВ на основе ТЭНа размер химзоны составляет приблизительно 0,03 мм. Ясно, что счетные сетки с размером ячеек около 0,1 мм, которые обычно применяются для моделирования процесса детонации в других ВВ, например, на основе ТАТБ (тринитротриаминобензол), с кинетикой МК, не всегда можно применять к ВВ на основе ТЭНа. Поэтому подход, связанный с использованием в трехмерных расчетах модели кинетики детонации, ранее не мог широко применяться в связи с его высокими требованиями к вычислительным ресурсам.

В данной работе описана методика расчета задач газовой динамики (реализованная в рамках методики Д [5]) с использованием адаптивно-встраиваемых лагранжевых сеток в трехмерном пространстве. Приведен тестовый расчет, который демонстрирует работоспособность реализованных алгоритмов.

1. Методика расчета трехмерной газодинамики на адаптивно-встраиваемой лагранжевой сетке

Условимся называть ячейки регулярной сетки – основными, а ячейки встроеной сетки – адаптивными. На рис. 1 показана одна из регулярных ячеек (основная) счетной сетки, встроеной сетка в ней состоит из 8 адаптивных ячеек. Одна из адаптивных ячеек выделена цветом.

1.1. Алгоритм для локального сгущения счетной сетки

Для увеличения точности расчета и правильного описания процесса детонации предполагается проводить локальное сгущение счетной сетки во взрывчатом веществе (ВВ) перед фронтом ударной и детонационной волн, поэтому условия, при которых производится сгущение и разрежение счетной сетки, отличаются от критериев, приведенных в работе [2]. В качестве критерия для сгущения сетки выбрана величина изменения полной искусственной вязкости. Пусть текущая ячейка имеет номер столбца i , номер строки j и номер листа k . Найдем изменение значения искусственной вязкости в ячейках с номерами столбцов, строк, и листов i_1 , j_1 и k_1 из интервалов $i-1 \leq i_1 \leq i+1$, $j-1 \leq j_1 \leq j+1$, $k-1 \leq k_1 \leq k+1$.

Будем создавать встроеной сетку в ячейке, если в любой ячейке с номером строки, столбца и листа из этого интервала выполнены следующие условия:

$$\begin{cases} \varepsilon(i_1, j_1, k_1) - \varepsilon^{n-1}(i_1, j_1, k_1) > 0; \\ \varepsilon(i_1, j_1, k_1) > c_1 p(i_1, j_1, k_1). \end{cases} \quad (1)$$

где c_1 – некоторая константа (в расчетах используется значение $c_1 = 10^{-4}$, подобрано на основе тестовых расчетов), ε – значение искусственной вязкости на текущем временном шаге, ε^{n-1} – значение искусственной вязкости на предыдущем временном шаге, p – значение давления на текущем временном шаге.

При выполнении этих условий в основной ячейке строится адаптивная сетка. Данная процедура делится на три этапа:

1. Расстановка узлов на ребрах.
2. Построение сетки на гранях.
3. Построение сетки внутри ячейки.

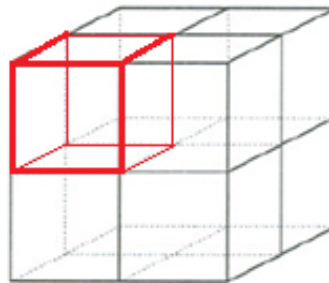


Рис. 1. Основная ячейка, содержащая 8 адаптивных ячеек

На первом и втором этапах проверяется наличие встроенной сетки в соседних ячейках, и если таковые имеются, то на соответствующих ребрах/гранях координаты новых узлов не вычисляются, а используются уже существующие. Это является одним из условий методики, так как встроенная сетка в соседних ячейках должна быть состыкована «узел в узел» по смежным ребрам и граням. Если же встроенная сетка в соседних ячейках отсутствует, то узлы на ребрах расставляются равномерно, а для построения сетки на гранях используется достаточно известный алгоритм «двойной интерполяции». В качестве начальных данных для этого алгоритма подаются координаты узлов на соответствующих ребрах.

На последнем третьем этапе по уже известным координатам узлов на гранях в ячейке строится внутренняя сетка. При сгущении во все новые адаптивные ячейки заносятся газодинамические величины, равные величинам в основной ячейке. Значения скоростей интерполируются аналогично по значениям скоростей в вершинах основной ячейки.

1.2. Алгоритм для локального разрежения счетной сетки

Будем производить удаление встроенной сетки в ячейках с ВВ после прохождения волны и полного выгорания ВВ. В качестве критерия для удаления адаптивных ячеек были выбраны значения давления и концентрации ВВ. Будем удалять адаптивные ячейки в основной ячейке с номером столбца i , номером строки j и номером листа k , если выполнены условия:

$$\begin{cases} P(i, j, k) \leq c_2; \\ C_{\text{vv}}(i, j, k) \leq c_3, \end{cases} \quad (2)$$

где c_2, c_3 – некоторые константы (в расчетах используются значения $c_2 = 3, c_3 = 0,01$, подобраны на основе тестовых расчетов). P, C_{vv} – средние значения давления и концентрации ВВ в ячейке на текущем временном шаге. Помимо выполнения условий (2), необходимо, чтобы во всех адаптивных ячейках, содержащихся в основной ячейке, находилось одно и то же вещество.

Учитывая лагранжев характер течения, при удалении адаптивных ячеек недостаточно усреднить газодинамические (ГД) величины и удалить структуры встроенной сетки. Это связано, в первую очередь, с тем, что в общем случае граница между двумя регулярными ячейками, содержащими встроенную сетку, представляет собой не плоскость, а некую поверхность. Поэтому при удалении встроенной сетки необходимо спрямить ребра и грани ячейки и локально переинтерполировать ГД массивы адаптивных ячеек на новую сетку. Отметим тот факт, что если в результате такой локальной переинтерполяции возникает ситуация, когда в новых адаптивных ячейках будут содержаться разные вещества, то в этом случае удаления происходить не будет. В противном случае такие действия могут приводить к искажению границы раздела веществ, а также к возможной потере массы и внутренней энергии системы.

Усреднение ГД величин в регулярной ячейке при удалении встроенной сетки происходит по формулам:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad P = \frac{\sum_{i=1}^N P_i V_i}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad E = \frac{\sum_{i=1}^N E_i m_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad (3)$$

где N – число малых адаптивных ячеек, ρ – плотность, P – давление, E – внутренняя энергия, m – масса, V – объем, $\rho_i, P_i, E_i, m_i, V_i$ – величины, относящиеся к i -й адаптивной ячейке.

Остальные ГД величины (вязкость, концентрация ВВ и пр.) усредняются по объему.

1.3. Метод расчета трехмерной газовой динамики

Перед вычислением газодинамических величин на очередном временном шаге в ячейке исходной сетки при выполнении соответствующего критерия строится адаптивная сетка, размерность встроенной сетки одинаковая для всех ячеек математической области и задается исполнителем расчета.

При счете газодинамической задачи по алгоритму, использующему адаптивно-встраиваемую сетку, вычисление газодинамических величин на временном шаге осуществляется по стандартным алгоритмам трехмерной методики Д [5]. При этом каждая основная ячейка первоначальной сетки, содержащая встроенную сетку, рассматривается как отдельная математическая область.

Рассмотрим, как производится аппроксимация уравнения движения. Сначала определим скорости в узлах основной сетки. Если в примыкающих к узлу ячейках нет встроенной сетки (узел 1 на рис. 2), то в этом случае при аппроксимации уравнения движения используются ГД величины из восьми ячеек регулярной сетки, окружающих узел 1, и скорости вычисляются по стандартным алгоритмам счета скоростей методики Д.

Если в окружающих узел ячейках присутствует встроенная сетка, при аппроксимации уравнения движения будем использовать газодинамические величины из ячеек встроенной сетки. Если в какой-либо из примыкающих к узлу ячеек нет встроенной сетки, то построим фиктивные адаптивные ячейки, определив недостающие узлы интерполяцией по величинам в узлах регулярной сетки.

Рассмотрим, например, как производится аппроксимация уравнения движения в точке 0 (рис. 3). Ячейка 2-0-3-4-5-6-7-8 содержит встроенную сетку, адаптивные ячейки, используемые при вычислении скорости в точке 0, выделены серым цветом.

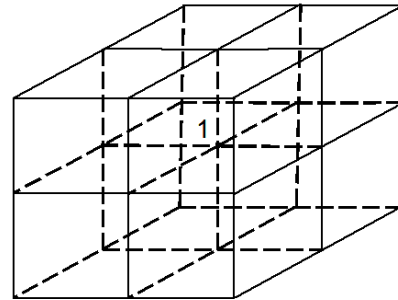


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

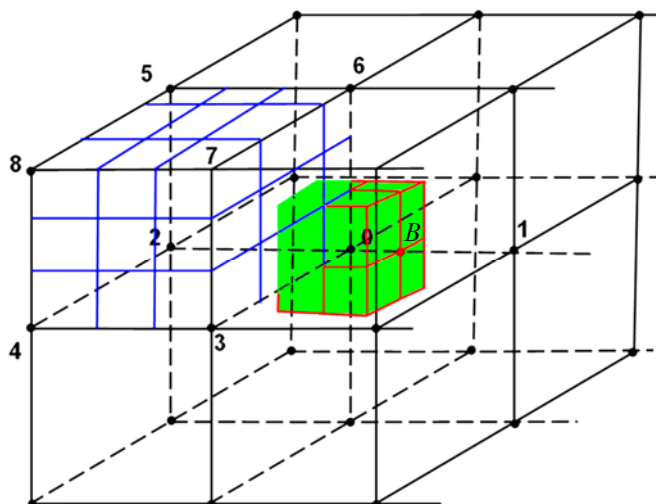


Рис. 3. Построение фиктивных адаптивных ячеек для аппроксимации уравнения движения в узле регулярной сетки

Рассмотрим более подробно нахождение фиктивных узлов. Найдем координаты узла дополнительной сетки B , который принадлежит отрезку $0-1$. На рис. 4 приведен фрагмент рис. 3.

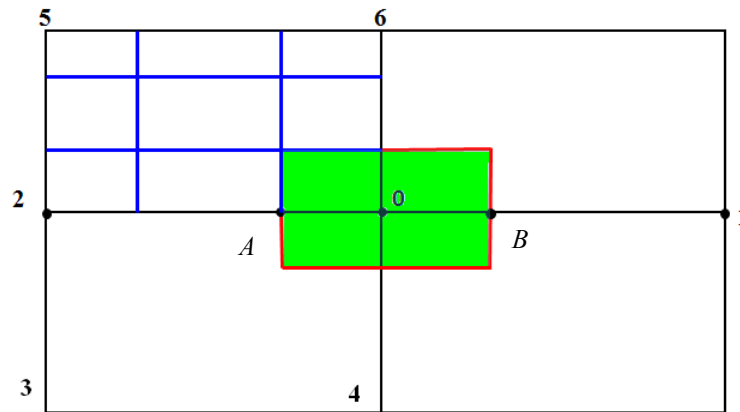


Рис. 4. Фрагмент рис. 3

Координаты точки B (рис. 3, 4) находим по формулам:

$$x_B = x_0 + \frac{x_1 - x_0}{r_{01}} r_{0A}, \quad y_B = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{r_{01}} r_{0A}, \quad z_B = z_0 + \frac{z_1 - z_0}{r_{01}} r_{0A},$$

где r_{01} , r_{0A} – расстояния между точками $0-1$ и $0-A$ соответственно. Координаты других фиктивных узлов находятся аналогично.

Значения плотности и давления в построенных дополнительных адаптивных ячейках определим из соответствующих основных ячеек регулярной сетки. Тогда аппроксимация уравнения движения в узле 0 адаптивной сетки производится стандартным способом, так же, как и в узле регулярной сетки.

После нахождения скоростей в узлах исходной сетки вычисляются скорости в узлах адаптивных ячеек, которые находятся на гранях и ребрах регулярной сетки. Если во всех основных ячейках, которым принадлежит ребро или грань, есть встроенная сетка, то для аппроксимации уравнения движения используются газодинамические величины в ячейках и узлах встроенной сетки. Если в какой-либо из ячеек регулярной сетки встроенная сетка отсутствует, то недостающие фиктивные адаптивные ячейки достраиваются интерполяцией по узлам регулярной сетки. Рассмотрим, например, как производится аппроксимация уравнения движения в узле встроенной сетки K (рис. 5), находящейся на границе ячеек регулярной сетки (на ребре $1-3$). Ячейка $2-1-3-4-5-6-7-8$ содержит встроенную сетку, серым цветом показаны ячейки встроенной сетки, используемые при вычислении скорости в точке 0 , и фиктивные адаптивные ячейки.

Скорость в точке M , находящейся на границе встроенной и регулярной сетки (на грани $3-1-6-7$), находится аналогичным образом. Чтобы не допустить искривления ребер и сильного искажения граней регулярной сетки, скорости, вычисленные в узлах на границе регулярной и адаптивной сетки, проектируются на ребра (пример – узел K) или грани (пример – узел M) исходной сетки.

После вычисления скоростей точек, расположенных на ребрах и гранях регулярной сетки, находятся значения скоростей во внутренних узлах встроенной сетки и ГД величины в каждой ячейке исходной сетки. Если в ячейке регулярной сетки есть встроенная сетка, при вычислении ГД величин эти ячейки адаптивной сетки рассматриваются как отдельная область, где в качестве граничных условий используются уже рассчитанные скорости и аппроксимация уравнений газодинамики производится по стандартным алгоритмам трехмерной методики Д.

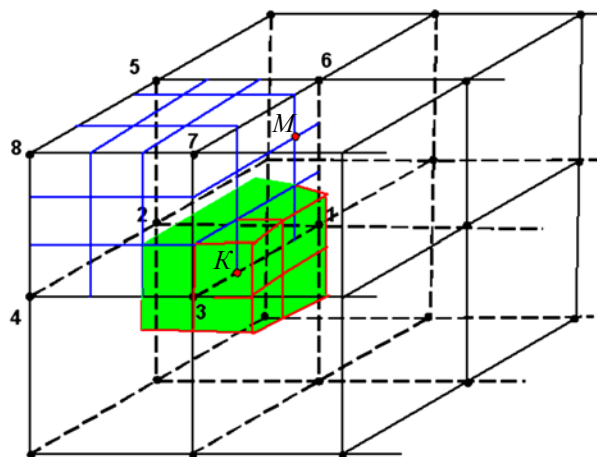


Рис. 5. Построение фиктивных адаптивных ячеек для аппроксимации уравнения движения в узле адаптивной сетки на границе регулярной и адаптивной сеток

2. Численное моделирование эксперимента для определения влияния слабых ударных волн на распространение детонационной волны в прутках ВВ

2.1. Физическая постановка задачи и результаты эксперимента

Разработанный алгоритм был протестирован на экспериментах, целью которых было исследование процесса влияния слабых ударных волн (УВ) на распространение детонационной волны (ДВ) в прутках ВВ на основе ТЭНа. Объект испытания представлял собой экспериментальную модель, в которой группа из 16 параллельных прутков нагружается УВ от пластины ВВ через клиновую демпфирующую преграду из оргстекла (рис. 6). На рис. 6 вверху черным цветом выделена пластина ВВ, а внизу черными квадратиками – прутки ВВ. Иницирование в пластине ВВ задается на внешнем торце (рис. 6) одновременно, также одновременно задается иницирование на торцах всех 16 прутков, но с противоположной стороны от поверхности иницирования в пластине ВВ, т. е. в этих опытах ослабленная демпфирующей преградой УВ от пластины ВВ и ДВ в прутках ВВ движутся навстречу друг другу.

В проведенном опыте толщина пластины была задана равной 0,8 мм. Демпфирующий клин из оргстекла имел размеры: минимальная толщина – 4 мм, максимальная толщина – 13,6 мм, длина – 167 мм (угол наклона 3°) – и располагался так, что амплитуда нагружающей ударной волны от прутка к прутку изменялась, но для любого из них ее величина была постоянной вдоль всего прутка. Полная толщина оргстекла между нагружаемыми прутками и пластиной с учетом того, что прутки ВВ расположены в пластине из оргстекла, изменялась от 12,1 мм до 21,8 мм. Два крайних прутка не подвергались воздействию ударной волны и использовались как контрольные. Прутки имели сечение 2×2 мм. Расстояние между их осями – 12 мм, плотность прутков ВВ – $1,48 \text{ г/см}^3$.

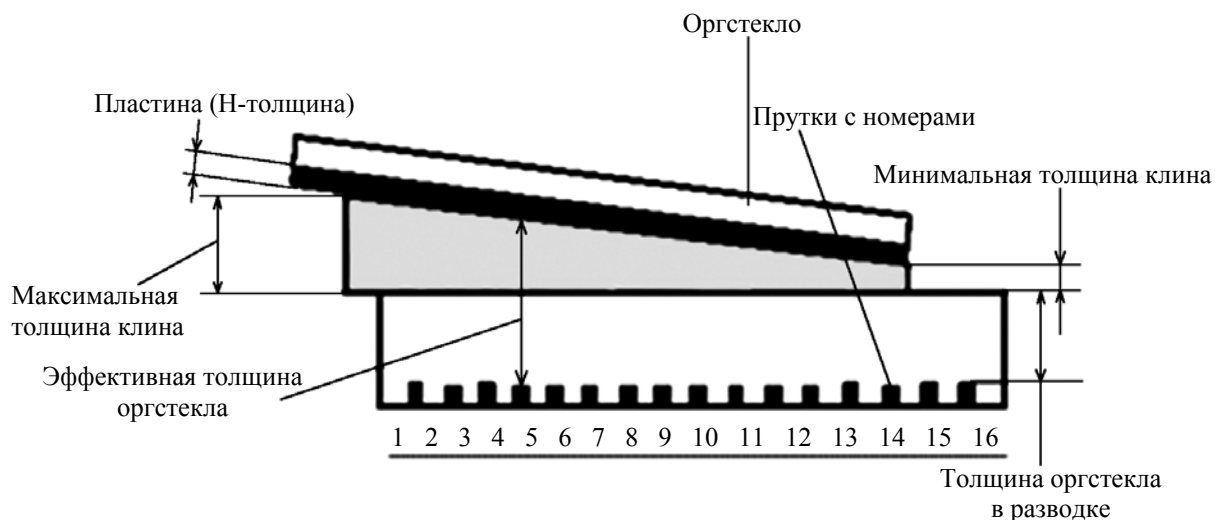


Рис. 6. Схема модели со встречным движением УВ и ДВ

Экспериментально инициирование и распространение детонации в прутках или прерывание в них детонации определяли по бризантному следу на пластине-отметчике из алюминия толщиной 5 мм. Пластина-отметчик располагалась вплотную к пруткам. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных измерений.

Таблица 1

Результаты экспериментальных измерений

№ прутка	Эффективная толщина оргстекла, мм	Наличие детонации в прутке	№ прутка	Эффективная толщина оргстекла, мм	Наличие детонации в прутке
1	21,1	+	9	15,6	+
2	20,4	+	10	14,9	+
3	19,8	+	11	14,2	+
4	19,1	+	12	13,5	-
5	18,4	+	13	12,8	-
6	17,7	+	14	12,1	+
7	17,1	+	15	-	+
8	16,3	+	16	-	+

Эффективная толщина оргстекла измерена по проекции осевой линии прутка ВВ. На рис. 7 приведена фотография пластины-отметчика при встречном движении УВ и ДВ. На ней видны следы от воздействия прутков ВВ и УВ от пластины ВВ. На фотографии пластины-отметчика видно, что в зоне А детонация в прутках 12-13 не произошла. В зоне В прутки 1-11 сдетонировали, но на данный момент времени еще не произошло взаимодействие с УВ от пластины ВВ. Два крайних справа от зоны А контрольных прутка 15-16 (без воздействия ударной волны) и прутки 14 сдетонировали. По результатам эксперимента можно сделать вывод, что при толщине пластины из ВВ 0,8 мм и толщине демпфера из оргстекла от 12,1 мм до 21,1 мм, при встречном движении УВ и ДВ, детонация распространяется по двенадцати нагружаемым пруткам из четырнадцати (1-11 и 14 прутки).

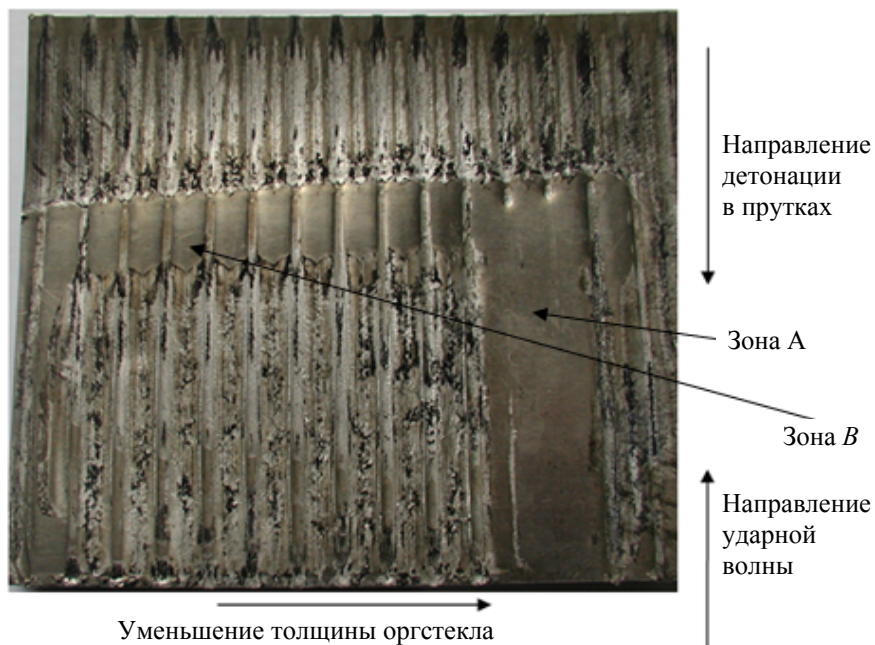


Рис. 7. Пластина-отметчик после опыта при встречном движении УВ и ДВ

2.2. Математическая постановка и результаты расчета

На рис. 8 приведена геометрия системы и окружающих слоев в том виде, в котором она использовалась в расчетах. Отметим, что в расчетных рисунках нумерация прутков и угол наклона пластины ВВ противоположны «физическому» рис. 6.

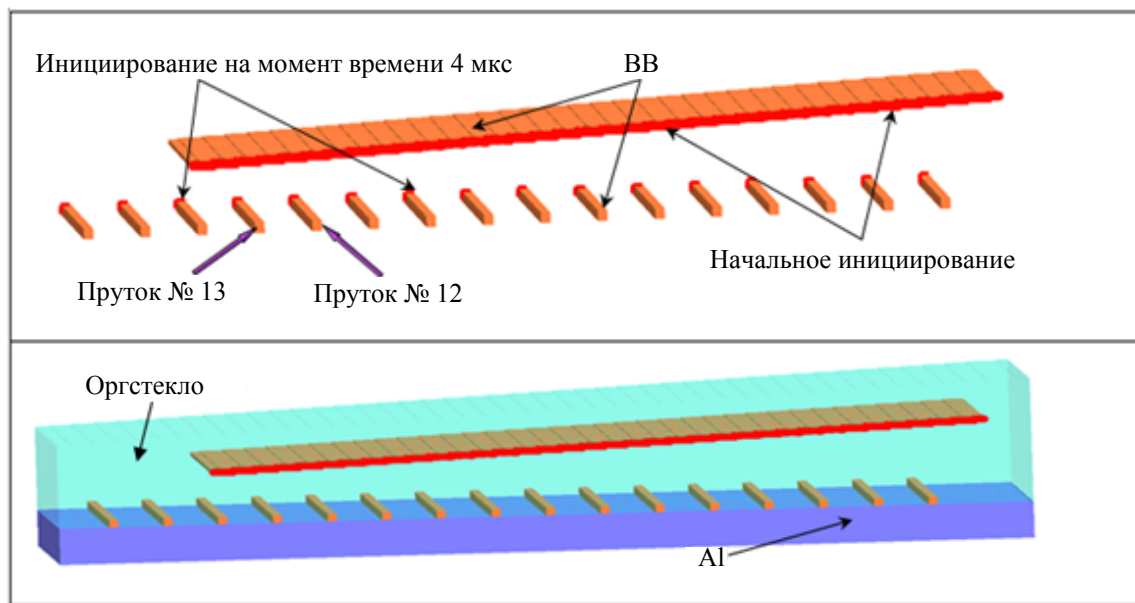


Рис. 8. Геометрия расчетов (см. цветную вкладку)

Параметры используемых уравнений состояния (УРС) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры УРС в расчетах

Вещество	ρ_{00} , г/см ³	УРС
Оргстекло	1,18	УРС с предельной плотностью [6, 7]
Al	2,7	УРС с предельной плотностью [6, 7]
ВВ	1,525	Детонация с кинетикой по модели МК [4]

Расчеты проводились в однообластной лагранжевой постановке в многопроцессорном режиме с использованием 600–900 процессоров на кубической лагранжевой сетке, состоящей из 200 столбцов, 856 строк и 176 листов (всего ~30 млн регулярных ячеек). Общее число ячеек (регулярные + адаптивные) на конец расчета составило ~150 млн. Использовалась статистическая балансировка арифметической нагрузки процессоров. Отметим, что для проведения такого расчета без использования адаптивно-встраиваемых ячеек, потребовалось бы использовать около 4 млрд счетных регулярных ячеек, а значит, не менее 30–40 тыс. процессоров.

Расчетная область представляет собой параллелепипед размером 21,4 см × 4,4243 см × 5 см: $0 \leq X \leq 21,4$, $0 \leq Y \leq 4,4243$, $-196,85 \leq Z \leq -191,85$. На всех границах (за исключением границ, на которых задается инициирование ВВ) задано условие свободной поверхности. На границах области, где производится инициирование ВВ, – жесткая стенка. Расчет начинался с инициирования (по поверхности сечения) пластины из ВВ. После чего по всей пластине рассчитывался процесс распространения детонации с использованием модели кинетики МК.

Отметим, что кинетика МК описывает десенсибилизацию ВВ при предварительном нагружении и сенсбилизацию ВВ при предварительной разгрузке. Для ВВ на основе ТЭНа существует особенность: при повторном нагружении вещества стационарная детонация не возникает лишь тогда, когда плотность ВВ превышает некоторую критическое значение. Если же плотность ВВ к моменту прихода повторного нагружения меньше этого критического значения, формируется стационарная детонация, и этот факт подчеркнут в [4].

Перед детонационной волной в ячейках с ВВ строилась адаптивная сетка размерностью 5×5×5. Размер ячейки адаптивной сетки был равен 0,005 см. В момент времени 4 мкс по поверхности сечения инициировались каналы из ВВ. Таким образом моделировалось направленное движение навстречу друг другу УВ и ДВ в прутках ВВ. На рис. 9, 10 показаны распределения веществ и поля давления, а также расчетная сетка во фрагменте сечения прутков на момент времени 7 мкс.

На рисунке видно, что перед детонационной волной в ячейках с ВВ строится адаптивная сетка. После прохождения волны при выполнении соответствующего критерия построенная адаптивная сетка удаляется. На рис. 11 показано распределение давления в оргстекле на момент времени 8 мкс.

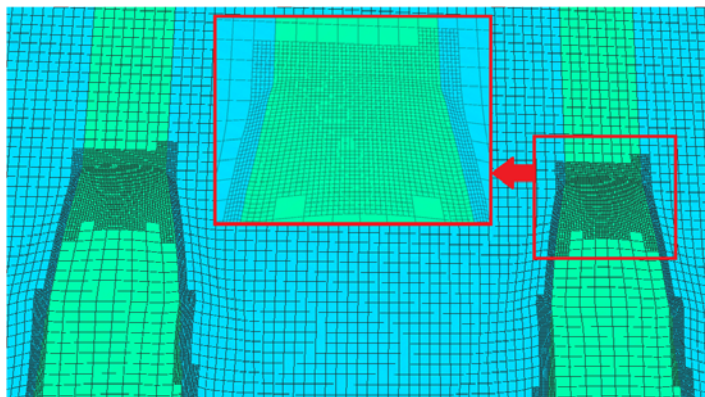


Рис. 9. Фрагмент расчетной сетки и распределение веществ в сечении прутков (см. цветную вкладку)

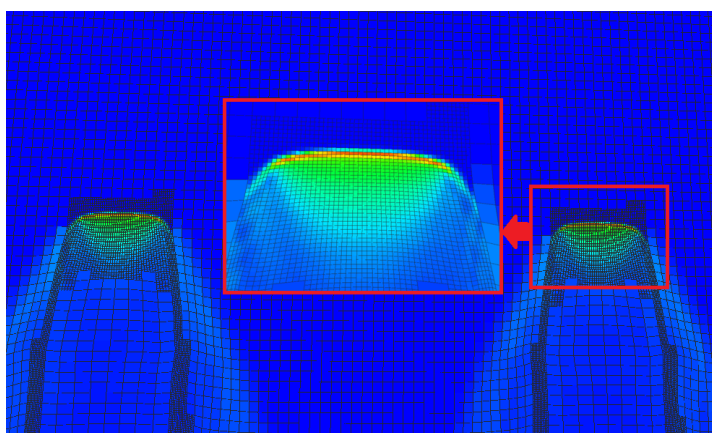


Рис. 10. Фрагмент расчетной сетки и распределение поля давлений в сечении прутков на момент времени 7 мкс (см. цветную вкладку)

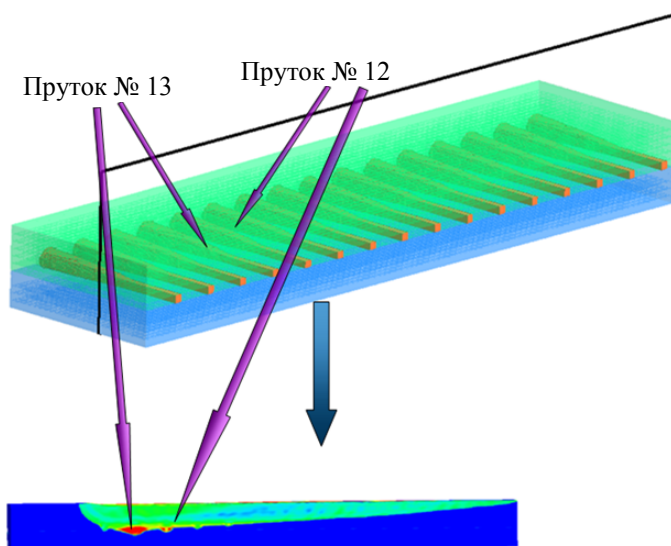


Рис. 11. Распределение давления в сечении геометрии задачи на момент времени 8 мкс (см. цветную вкладку)

Из рисунка видно, что с увеличением толщины демпфирующего клина из оргстекла интенсивность воздействия от пластины из ВВ уменьшается. Прутки, над которыми толщина демпфирующего клина минимальна, испытывают наибольшее воздействие ударной волны, проходящей от пластины. Максимальное значение нагружения составляет 0,9 ГПа. На рис. 12 приведено распределение плотности в прутках на момент времени 8 мкс.

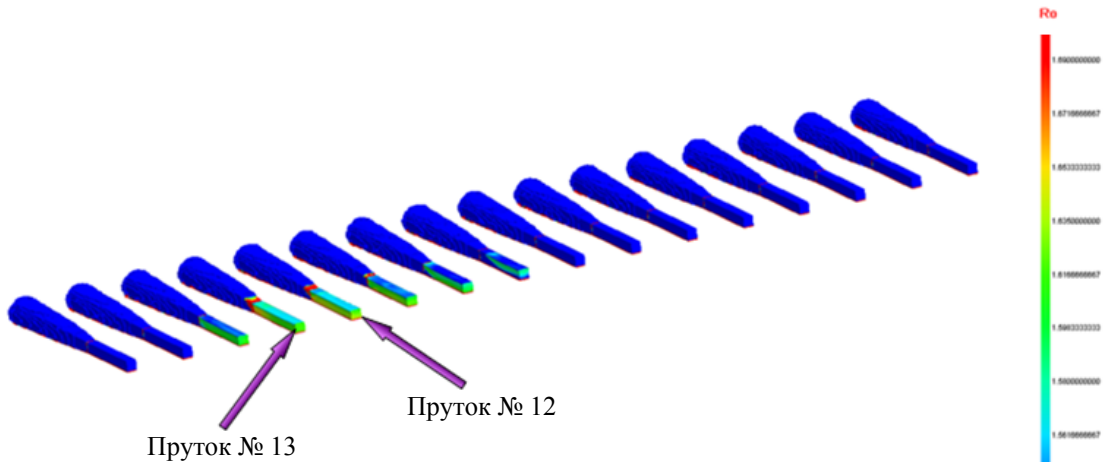


Рис. 12. Распределение плотности в прутках на момент времени 8 мкс (см. цветную вкладку)

Из рисунка видно, что в прутках 12, 13 в результате предварительного нагружения наблюдается значительное (более чем $1,69 \text{ г/см}^3$) локальное увеличение плотности, что впоследствии приводит к прерыванию детонации в этих прутках (рис. 13).

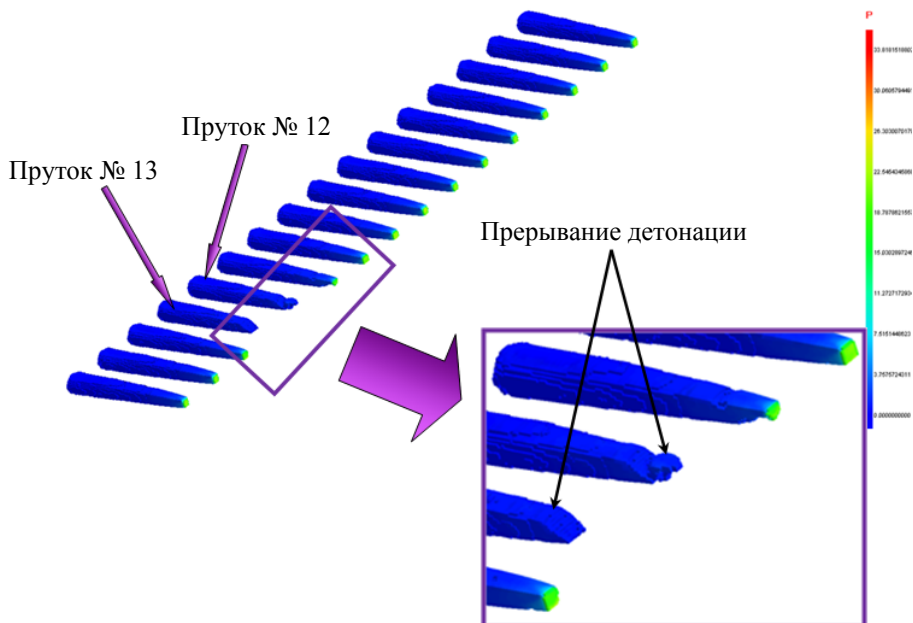


Рис. 13. Распределение давления в прутках на момент времени 8,7 мкс (см. цветную вкладку)

На рис. 14 приведены распределения концентрации невыгоревшего ВВ в одном из сечений, проходящего через прутки на момент времени 8,7 мкс.

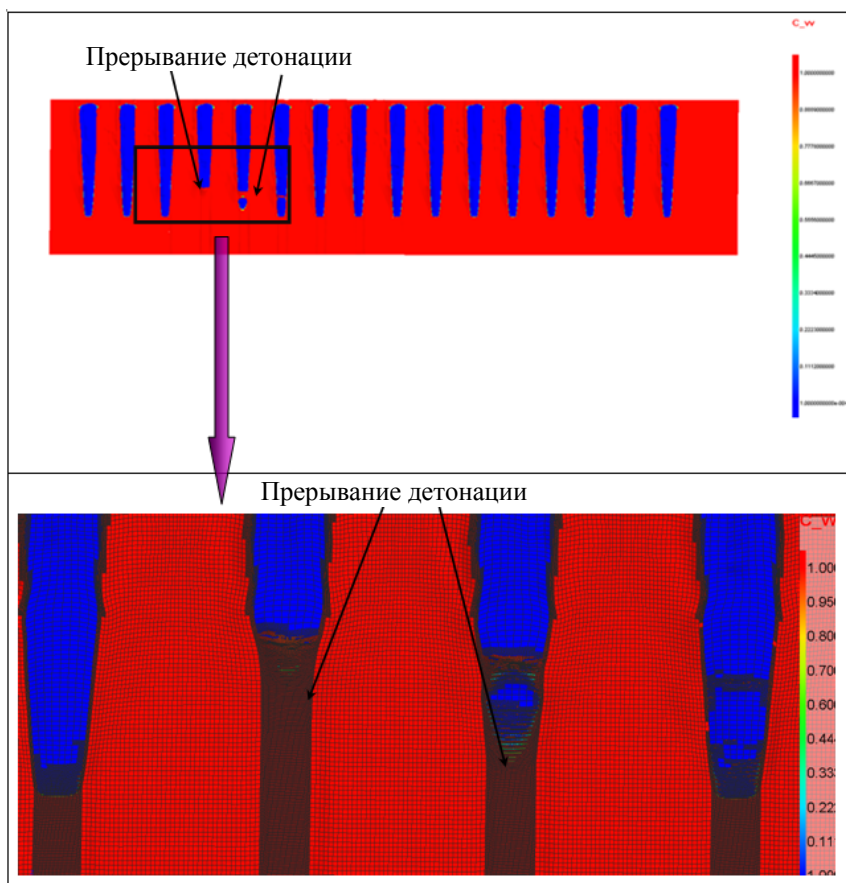


Рис. 14. Распределения концентрации невыгоревшего ВВ в одном из сечений, проходящих через прутки на момент времени 8,7 мкс (см. цветную вкладку)

Из рисунков видно, что в прутках № 12 и 13, которые испытывают наибольшее воздействие ударной волны, приходящей от пластины, детонация прерывается, что соответствует данным эксперимента. Также видно, что из-за разной интенсивности нагружения получен режим полного затухания в прутке 13 и режим с временным возобновлением горения в прутке 12.

Заключение

В методике Д реализована возможность моделирования задач газовой динамики с использованием адаптивно-встраиваемых лагранжевых сеток. Актуальность разработки такого алгоритма определяется необходимостью ее применения при численном моделировании инициирования и распространения детонации с учетом моделей кинетики ВВ. Это обусловлено тем, что, например, для ВВ на основе ТЭНа, размер химзоны составляет всего 0,03 мм, поэтому характерный размер счетных ячеек не должен сильно превышать эту величину. Реализованные алгоритмы до-

казали свою работоспособность на примере численного моделирования эксперимента по определению влияния слабых ударных волн на распространение детонационной волны в прутках ВВ на основе ТЭНа.

Отметим, что общее число ячеек (основные и адаптивные) в расчете на момент времени 8,7 мкс составило ~150 млн (число используемых процессоров – 800). Для проведения такого же расчета с учетом модели кинетики детонации, но без использования встроенных сеток, потребовалось бы около 4 млрд счетных ячеек и не менее 20 000 процессоров. Таким образом, можно говорить о том, что разработанная и реализованная методика является очень экономичной в плане требуемых вычислительных ресурсов.

Полученный результат является итогом работы по совершенствованию математических алгоритмов для расчетов инициирования и развития детонации по современным физическим моделям. Получена возможность не только проводить расчеты в более сложной геометрии, но и использовать численное моделирование как инструмент подробного анализа внутренней структуры процесса.

Список литературы

1. Лисейкин В. Д. Обзор методов построения структурных адаптивных сеток // ЖВММФ. 1996. Т. 36, № 1. С. 3–41.
2. Муругова О. О., Чернышев Ю. Д. Численный метод решения уравнений газодинамики на адаптивной лагранжевой сетке в комплексе программ Д // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1999. Вып. 1. С. 61–67.
3. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В., Воронов Е. Г., Гужова А. Р., Дегтяренко Л. И., Жарова Г. В., Кучерова П. А., Стадник А. Л., Ховрин Н. А. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
4. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е., Соколов С. С., Шамраев Б. Н., Дмитриева Л. В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ // Химическая физика, 1995. Т. 14, № 2–3.
5. Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриева Л. В., Артемьев А. Ю., Будников В. И., Вершинин В. Б., Дмитриев Н. А., Корепова Н. В., Линник Д. М., Малиновская Е. В., Муругова О. О., Садчиков В. В., Самигулина Р. З., Суслова С. Ю., Хитева Е. С., Чернышев Ю. Д. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.
6. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. – Снежинск: ВНИИТФ, 1997, 203 с.
7. Копышев В. П. О простейшем уравнении состояния твердых тел // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2002. Вып. 1–2. С. 4–8.

Mathematical modeling of detonation process in 3d space using adaptive-in-built lagrangian grid in the «D» tecnique

L. A. Andreevskih, I. M. Epishkov, N. V. Korepova, D. M. Linnik, O. O. Murugova,
V. B. Titova, Yu. D. Chernyshev

The paper describes the calculation technique for 3D gas-dynamics problems on adaptive-in-built Lagrangian grids. The main idea in solving the gas-dynamics problems using adaptive-in-built grids is in the reduction of the initial grids cells in the course of the simulation in local areas with high gradients of gas-dynamics quantities. Such approach enables to improve significantly the accuracy of the numerical solution without overloading the simulation process with an overrefined grid, and making the simulation more cost-effective. This paper briefly describes the algorithms of the adaptive-in-built grids application as applied to the Lagrangian “D” technique, and shows the results of the numerical simulation of one experiment for the determination of weak shock effect on the detonation wave propagation in penthrite-based High-explosive rods using the described technique.