

УДК 519.6

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕТОНАЦИИ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМОЙ ЛАГРАНЖЕВОЙ СЕТКЕ В МЕТОДИКЕ "Д"

Л. А. Андреевских, И. М. Епишков, Н. В. Корепова, Д. М. Линник,  
О. О. Муругова, В. Б. Титова, Ю. Д. Чернышёв  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Описывается методика расчета трехмерных задач газовой динамики на адаптивно-встраиваемых лагранжевых сетках. Суть методики заключается в уменьшении размеров ячеек исходной расчетной сетки в процессе счета в локальных зонах с большими градиентами газодинамических величин. Кратко описаны алгоритмы использования адаптивно-встраиваемых сеток в лагранжевой методике Д. Приводятся результаты численного моделирования одного эксперимента по определению влияния слабых ударных волн на распространение детонационной волны в прутках взрывчатого вещества на основе ТЭНа с использованием описываемой методики.

*Ключевые слова:* трехмерная лагранжева методика Д, газовая динамика, кинетика детонации Морозова—Карпенко, адаптивно-встраиваемая лагранжева сетка.

### Введение

Идея использования адаптивно-встраиваемых сеток не является новой; достаточно большой обзор связанных с этим методов дается в работе [1]. Кроме того, в РФЯЦ-ВНИИЭФ накоплен опыт использования подобных сеток [2—4].

Основная идея численных методов решения уравнений газодинамики с использованием адаптивно-встраиваемых сеток состоит в уменьшении размеров ячеек в локальных зонах с большими градиентами газодинамических величин. 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, в частности, для численного моделирования горения взрывчатых веществ (ВВ) с использованием модели кинетики детонации Морозова—Карпенко (МК) [5]. 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 (тетранитропентаэритрита) раз-

мер химической зоны составляет приблизительно 0,03 мм. Ясно, что счетные сетки с размером ячеек около 0,1 мм, которые обычно используются при моделировании процесса детонации в других ВВ (например на основе ТАТБ (тринитротриаминобензола)) с кинетикой МК, не всегда можно применять к ВВ на основе ТЭНа. Поэтому подход, связанный с использованием модели кинетики детонации в расчетах трехмерных задач, ранее не мог широко применяться из-за его высоких требований к вычислительным ресурсам.

В данной работе описана методика расчета задач газовой динамики, реализованная в рамках методики Д [6] с использованием адаптивно-встраиваемых лагранжевых сеток в трехмерном пространстве. Приведен тестовый расчет, который демонстрирует применимость реализованных алгоритмов.

### Методика расчета трехмерной задачи газовой динамики на адаптивно- встраиваемой лагранжевой сетке

Условимся называть ячейки структурированной (регулярной) сетки основными, а ячейки

встроенной сетки — адаптивными. На рис. 1 показана одна из регулярных ячеек (основная) счетной сетки. Встроенная сетка в ней состоит из 8 адаптивных ячеек, одна из адаптивных ячеек выделена.

**Алгоритм локального сгущения счетной сетки.** Для увеличения точности расчета и правильного описания процесса детонации предполагается проводить локальное сгущение счетной сетки в ВВ перед фронтами ударной и детонационной волн, поэтому условия, при которых производятся сгущение и разрежение счетной сетки, отличаются от критериев, приведенных в работе [2]. В качестве основы критерия для сгущения сетки выбрано изменение полной искусственной вязкости.

Пусть текущая ячейка имеет номер столбца  $i$ , номер строки  $j$  и номер листа  $k$ . Найдем изменение 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 встроенную сетку в ячейке, если в любой ячейке с номерами строки, столбца и листа из указанного интервала выполнены следующие условия:

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

где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon^{n-1}$  — значения искусственной вязкости на текущем и предыдущем временных шагах;  $p$  — давление на текущем временном шаге;  $c_1$  — некоторая константа (используется значение  $c_1 = 10^{-4}$ , подобранное на основе тестовых расчетов).

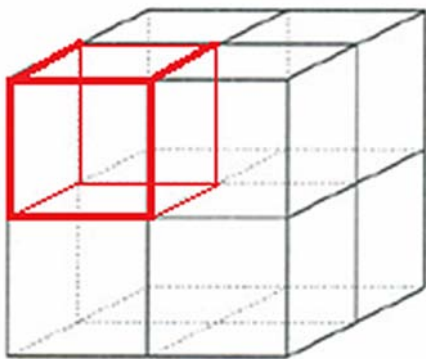


Рис. 1. Основная ячейка, содержащая 8 адаптивных ячеек

Процедура построения адаптивной сетки в основной ячейке делится на три этапа:

- 1) расстановка узлов на ребрах;
- 2) построение сетки на гранях;
- 3) построение сетки внутри ячейки.

На первом и втором этапах проверяется наличие встроенных сеток в соседних ячейках, и, если таковые имеются, на соответствующих ребрах/гранях координаты новых узлов не вычисляются, а используются уже существующие. Это является одним из условий методики, так как встроенные сетки в соседних ячейках должны быть состыкованы *узел в узел* по смежным ребрам и граням. Если же встроенные сетки в соседних ячейках отсутствуют, 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 используются координаты узлов на соответствующих ребрах.

На третьем этапе по уже известным координатам узлов на гранях в ячейке строится внутренняя сетка. При сгущении всем новым адаптивным ячейкам присваиваются значения газодинамических величин, равные значениям этих величин в основной ячейке. Значения скоростей интерполируются по значениям скоростей в вершинах основной ячейки.

**Алгоритм локального разрежения счетной сетки.** Будем производить удаление встроенной сетки в ячейках с ВВ после прохождения волны и полного выгорания ВВ. В основу критерия для удаления адаптивных ячеек положены значения давления и концентрации ВВ. Будем удалять адаптивные ячейки в основной ячейке с номерами столбца, строки и листа  $i$ ,  $j$  и  $k$ , если выполнены следующие условия:

$$P(i, j, k) \leq c_2; \quad C_{vv}(i, j, k) \leq c_3, \quad (1)$$

где  $P$ ,  $C_{vv}$  — средние значения давления и концентрации ВВ в ячейке на текущем временном шаге;  $c_2$ ,  $c_3$  — некоторые константы (используются значения  $c_2 = 3$ ;  $c_3 = 0,01$ , подобранные исходя из тестовых расчетов). Отметим, что, помимо выполнения условий (1), необходимо, чтобы во всех адаптивных ячейках, содержащихся в основной, находилось одно и то же вещество.

Учитывая лагранжев характер течения, при удалении адаптивных ячеек недостаточно усреднить газодинамические величины и удалить

структуры встроеной сетки. Это связано в первую очередь с тем, что в общем случае граница между двумя регулярными ячейками, содержащими встроены сетки, представляет собой не плоскость, а некую поверхность. Поэтому при удалении встроеной сетки необходимо спрямить ребра и грани ячейки и локально переинтерполировать массивы газодинамических величин адаптивных ячеек на новую сетку. Отметим, что если в результате такой локальной переинтерполяции возникнет ситуация, когда в новых адаптивных ячейках будут содержаться разные вещества, то удаления происходить не будет. В противном случае такие действия могут привести к искажению границы раздела веществ, а также к возможной потере массы и внутренней энергии системы.

Усреднение газодинамических величин в регулярной ячейке при удалении встроеной сетки производится по формулам

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

где  $N$  — число малых адаптивных ячеек;  $\rho$  — 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 газодинамические величины (вязкость, концентрация ВВ и пр.) усредняются по объему.

**Метод расчета трехмерной задачи газовой динамики.** Перед вычислением газодинамических величин на очередном временном шаге в ячейке исходной сетки при выполнении соответствующего критерия строится адаптивная сетка. Размеры встроеной сетки одинаковы для всех ячеек математической области и задаются исполнителем расчета.

При счете задачи газовой динамики по алгоритму, использующему адаптивно-встраиваемую сетку, вычисление газодинамических величин на временном шаге осуществляется по стандартным алгоритмам *трехмерной* методики Д [6]. При этом каждая основная ячейка исходной сетки, содержащая встроены 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 встроены сеток (узел 1 на рис. 2), то при аппроксимации уравнения движения используются газодинамические величины из восьми ячеек структурированной сетки, окружающих узел, и скорости вычисляются по стандартным алгоритмам счета скоростей методики Д.

Если в окружающих узел ячейках присутствуют встроены сетки, при аппроксимации уравнения движения будем использовать газодинамические величины из ячеек этих сеток. Если в какой-либо из примыкающих к узлу ячеек нет встроеной сетки, то построим фиктивные адаптивные ячейки, определив недостающие узлы интерполяцией по узлам структурированной сетки.

Например, примыкающая к точке 0 (рис. 3, см. также цветную вкладку) ячейка 2-0-3-4-5-6-7-8 содержит встроены сетку, которая выделена синим цветом. Зеленым цветом обозначены адаптивные ячейки, используемые при вычислении скорости в точке 0. Построенные дополнительные фиктивные адаптивные ячейки выделены красным цветом.

Рассмотрим более подробно нахождение фиктивных узлов. Найдем координаты узла  $B$  дополнительной сетки, который принадлежит отрезку 0-1 (увеличенное сечение геометрии, изображенной на рис. 3, приведено на рис. 4).

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

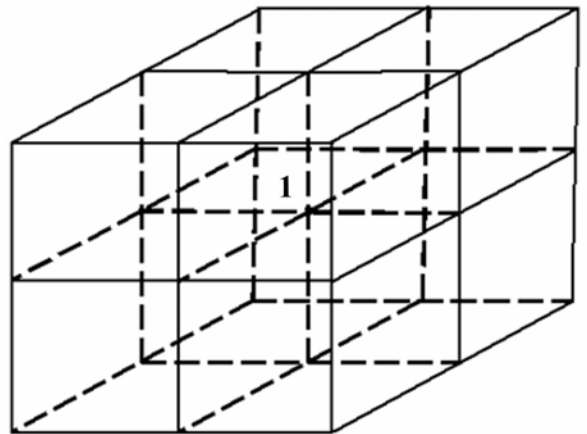


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

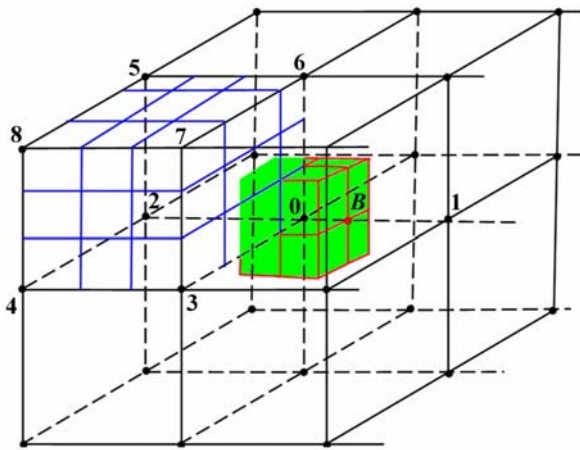


Рис. 3. Построение фиктивных адаптивных ячеек для аппроксимации уравнения движения в узле структурированной сетки

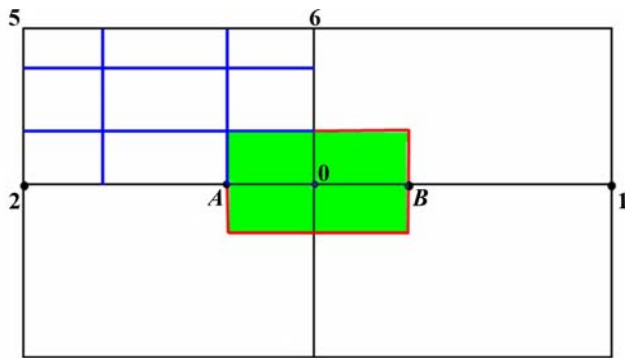


Рис. 4. Сечение геометрии, изображенной на рис. 3

$$x_B = x_0 + \frac{x_1 - x_0}{r_{01}} r_{0A}; \quad y_B = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{r_{01}} r_{0A};$$

$$z_B = z_0 + \frac{z_1 - z_0}{r_{01}} r_{0A},$$

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 берутся из соответствующих основных ячеек структурированной сетки. Тогда аппроксимация уравнения движения в узле 0 адаптивной сетки будет производиться стандартным способом, как в узле структурированной сетки.

После нахождения скоростей в узлах исходной сетки вычисляются скорости в узлах адаптивных ячеек, которые находятся на гранях и ребрах структурированной сетки. Если во всех основных ячейках, которым принадлежит ребро или грань, есть встроенные сетки, то для ап-

проксимации уравнения движения используются газодинамические величины из ячеек и узлов этих сеток. Если в какой-либо из ячеек структурированной сетки встроенная сетка отсутствует, то недостающие фиктивные адаптивные ячейки достраиваются интерполяцией по узлам структурированной сетки.

Рассмотрим, например, как производится аппроксимация уравнения движения в узле встроенной сетки  $K$  (рис. 5, см. также цветную вставку), находящемся на границе ячеек структурированной сетки (на ребре 1-3). Ячейка 2-1-3-4-5-6-7-8 содержит встроенную сетку, которая выделена синим цветом. Зеленым цветом обозначены ячейки встроенной сетки, используемые при вычислении скорости в точке 0, и фиктивные адаптивные ячейки. Построенные дополнительные фиктивные адаптивные ячейки выделены красным цветом.

Скорость в точке  $M$ , лежащей на границе встроенной и структурированной сеток (на грани 3-1-6-7), находится аналогичным образом.

Чтобы не допустить искривления ребер и сильного искажения граней структурированной сетки, скорости, вычисленные в узлах на границе структурированной и адаптивной сеток, проецируются на ребра (как, например, для узла  $K$ ) или грани (как, например, для узла  $M$ ) исходной сетки.

После вычисления скоростей в точках, расположенных на ребрах и гранях структурированной сетки, определяются значения скоростей во внутренних узлах встроенной сетки и газодина-

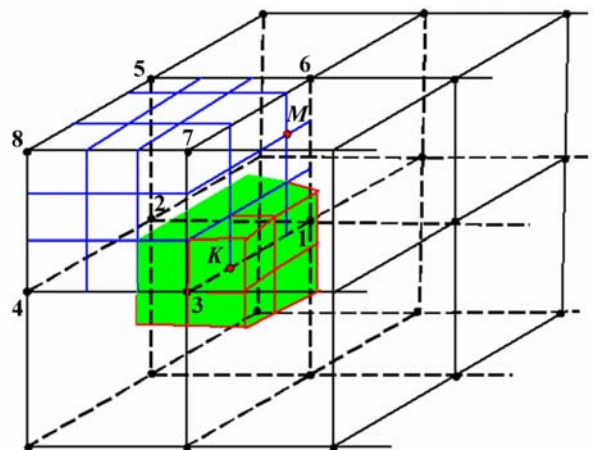


Рис. 5. Построение фиктивных адаптивных ячеек для аппроксимации уравнения движения в узле адаптивной сетки на границе структурированной и адаптивной сеток

мические величины в каждой ячейке исходной сетки. Если в ячейке структурированной сетки есть встроенная сетка, то при вычислении газодинамических величин каждая ячейка адаптивной сетки рассматривается как отдельная область, где в качестве граничных условий используются уже рассчитанные скорости, и аппроксимация уравнений газодинамики производится по стандартным алгоритмам трехмерной методики Д.

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

**Физическая постановка задачи и результаты эксперимента.** Разработанный алгоритм 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 из ВВ через клиновую демпфирующую преграду из оргстекла (рис. 6). Иницирование в пластине задается на внешнем торце одновременно по всей его поверхности, также одновременно задается иницирование на торцах всех 16 прутков, но с противоположной стороны от поверхности иницирования в пластине. То есть в этих опытах УВ от пластины из ВВ, ослабленная демпфирующей преградой, и ДВ в прутках ВВ движутся навстречу друг другу.

В проведенном опыте толщина пластины из ВВ задана равной 0,8 мм. Демпфирующий клин из оргстекла имел минимальную толщину 4 мм,

максимальную толщину 13,6 мм, длину 167 мм (угол наклона  $3^\circ$ ) и был расположен так, что амплитуда нагружающей УВ от прутка к прутку изменялась, но вдоль каждого прутка ее значение было постоянным. Полная толщина оргстекла между нагружаемыми прутками и пластиной с учетом того, что прутки ВВ расположены в пластине из оргстекла, изменялась от 12,1 до 21,8 мм. Два крайних прутка не подвергались воздействию УВ и использовались как контрольные. Прутки ВВ имели сечение  $2 \times 2$  мм, расстояние между осями прутков составляло 12 мм, плотность прутков —  $1,48 \text{ г/см}^3$ .

Иницирование и распространение детонации в прутках или прерывание в них детонации экспериментально определяли по бризантному следу на пластине-отметчике из алюминия толщиной 5 мм. Пластина-отметчик располагалась вплотную под прутками. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных измерений. 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 из ВВ. Видно, что детонации в прутках 12-13 (зона А) не произошло. Прутки 1-11 (зона В) сдетонировали, но на данный момент времени еще не произошло взаимодействия с УВ от пластины из ВВ. Пруток 14 и два крайних справа от зоны А контрольных прутка 15-16 (без воздействия) сдетонировали.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что при толщине пластины из ВВ 0,8 мм и толщине демпфера из оргстекла от 12,1 до 21,1 мм при встречном движении УВ и ДВ детонация распространяется по двенадцати



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

нагружаемым пруткам (1-11 и 14) из сорока пяти.

**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 на "расчетных" рисунках нумерация

Таблица 1

**Результаты экспериментальных измерений**

Номер прутка	Эффективная толщина оргстекла, мм	Наличие детонации в прутке
1	21,1	+
2	20,4	+
3	19,8	+
4	19,1	+
5	18,4	+
6	17,7	+
7	17,1	+
8	16,3	+
9	15,6	+
10	14,9	+
11	14,2	+
12	13,5	-
13	12,8	-
14	12,1	+
15	нет	+
16	нет	+

прутков и угол наклона пластины ВВ противоположны тем, что указаны на "физическом" (см. рис. 6).

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

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 около 4 млрд счетных регулярных ячеек, а значит, не менее 20 тыс. процессоров.

Таблица 2

**Параметры УРСов в расчетах**

Вещество	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	УРС
Оргстекло	1,18	С предельной плотностью [7, 8]
Al	2,7	С предельной плотностью [7, 8]
ВВ	1,525	Детонация с кинетикой по модели МК [5]

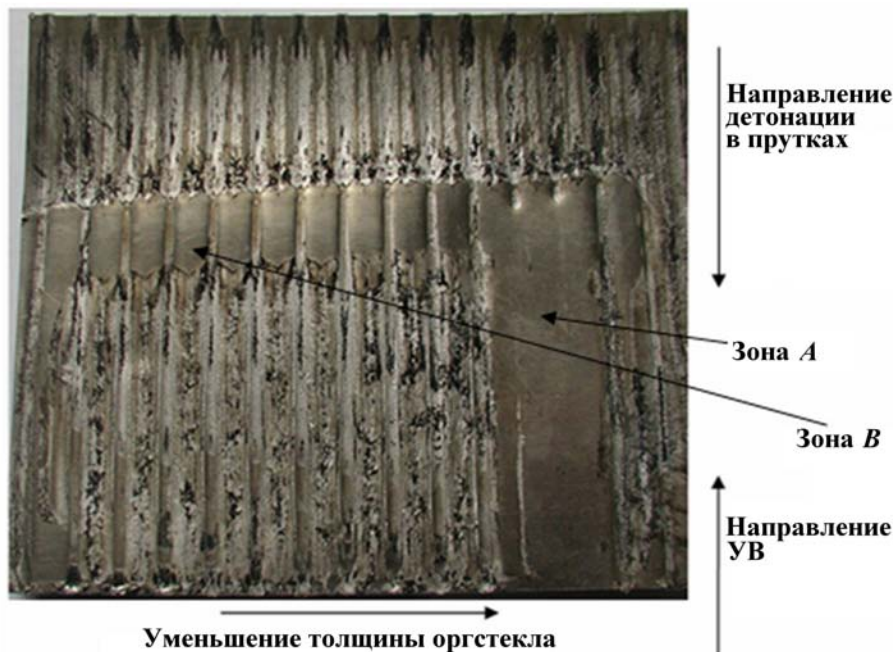


Рис. 7. Пластина-отметчик после опыта при встречном движении UV и ДВ



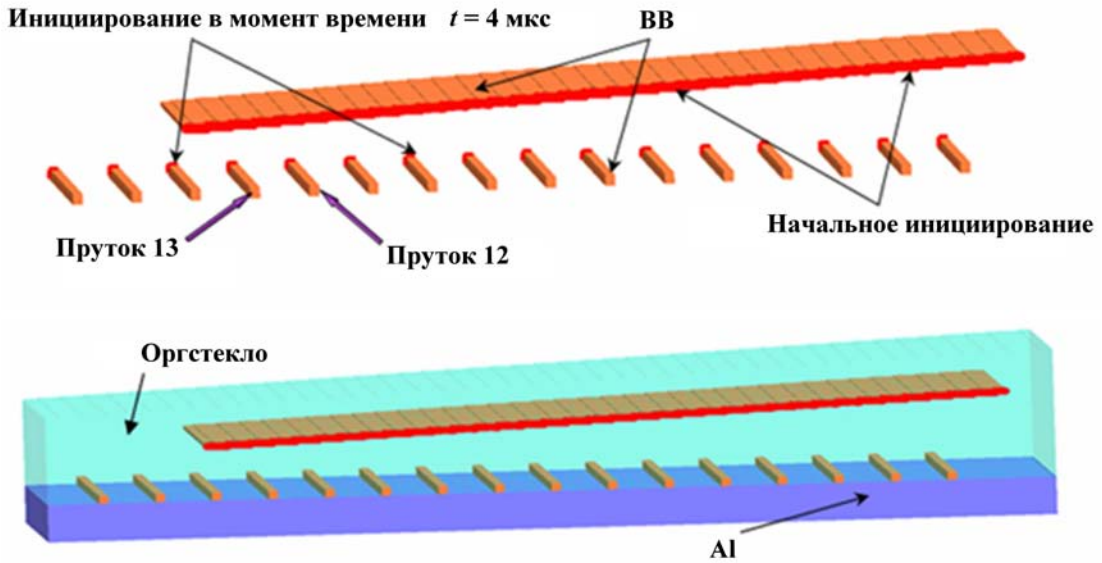


Рис. 8. Геометрия расчетов

Расчетная область представляет собой параллелепипед размером  $21,4 \times 4,4243 \times 5$  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 некоторое критическое значение. Если же плотность ВВ к моменту прихода повторного нагружения меньше этого критического значения, формируется стационарная детонация, и этот факт подчеркнут в [5].

На каждом временном шаге перед фронтом ДВ в ячейках с ВВ строилась адаптивная сетка  $5 \times 5 \times 5$ . Размер ячейки адаптивной сетки был равен 0,005 см. В момент времени  $t = 4$  мкс по поверхности сечения инициировались прутки из ВВ. Таким образом, моделировалось направленное движение навстречу друг другу УВ и ДВ в прутках ВВ.

На рис. 9, 10 (см. также цветную вкладку) показано распределение веществ и поля давления, а также расчетная сетка во фрагменте сечения прутков на момент времени  $t = 7$  мкс. Из рисунков видно, что перед фронтом ДВ в ячейках с ВВ построена адаптивная сетка. После прохождения волны при выполнении соответствующего критерия построенная адаптивная сетка удаляется.

На рис. 11, 12 (см. также цветную вкладку) показано распределение давления в оргстекле при  $t = 5,5; 7; 8$  мкс. 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 УВ, приходящей от пластины. Максимальное значение нагружения составляет 0,9 ГПа.

На рис. 13 (см. также цветную вкладку) приведено распределение плотности в прутках на момент времени  $t = 8$  мкс. Видно, что в прутках 12, 13 в результате предварительного нагружения наблюдается значительное локальное увеличение плотности (более чем  $1,69 \text{ г/см}^3$ ), что впоследствии приводит к прерыванию детонации в этих прутках (рис. 14, 15, см. также цветную вкладку).

На рис. 16 (см. также цветную вкладку) приведены распределения концентрации невыгоревшего ВВ в одном из сечений, проходящих через прутки, на момент времени  $t = 8,7$  мкс.

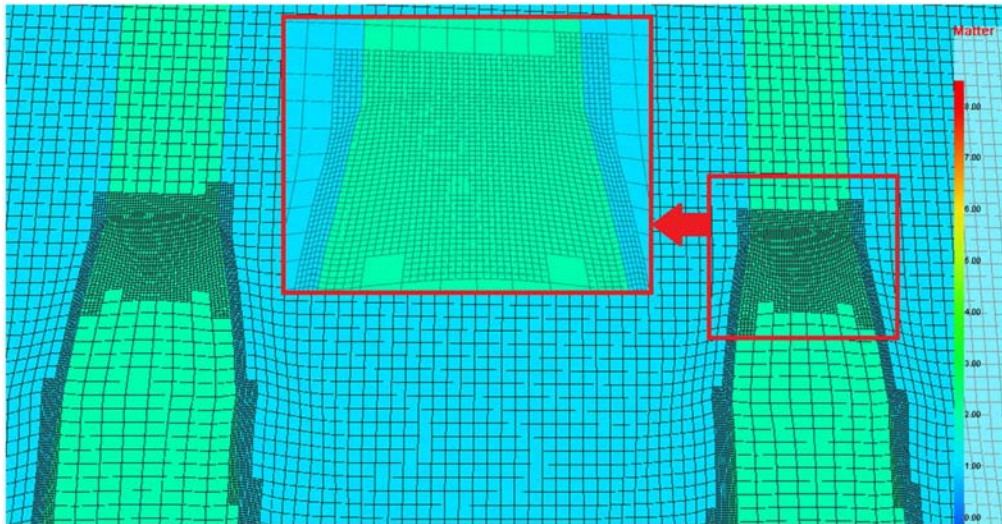


Рис. 9. Фрагмент расчетной сетки и распределение веществ в сечении прутков,  $t = 7$  мкс

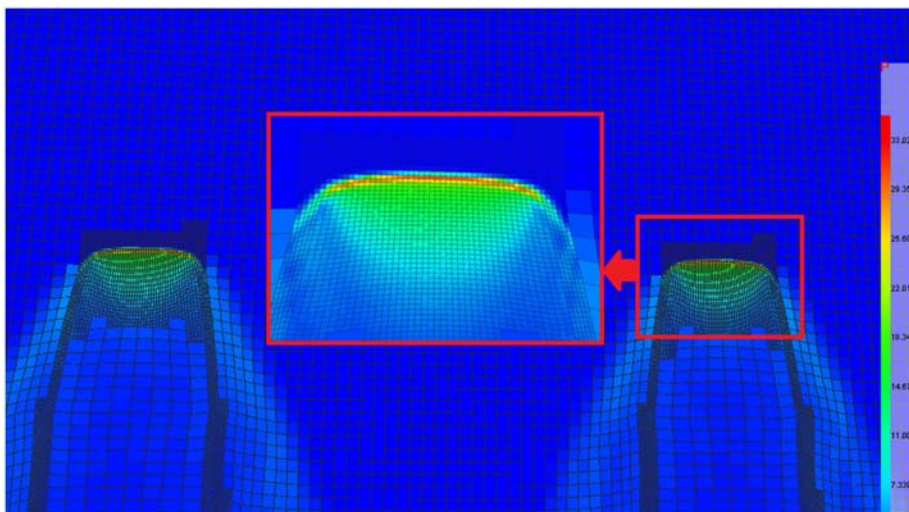


Рис. 10. Фрагмент расчетной сетки и распределение давления в сечении прутков,  $t = 7$  мкс

Из рис. 15, 16 видно, что в прутках 12 и 13, которые испытывают наибольшее воздействие УВ, приходящей от пластины, детонация прерывается, что соответствует данным эксперимента. Из рис. 16 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 такого алгоритма определяется необходимостью его применения при чис-

ленном моделировании инициирования и распространения детонации с учетом моделей кинетики ВВ. Это обусловлено тем, что, например, для ВВ на основе ТЭНа размер химической зоны составляет всего 0,03 мм, поэтому характерный размер счетных ячеек не должен сильно превышать это значение. Реализованные алгоритмы доказали свою применимость на примере численного моделирования эксперимента по определению влияния слабых УВ на распространение ДВ в прутках ВВ на основе ТЭНа.

Отметим, что общее число ячеек (основные и адаптивные) в расчете на момент времени  $t = 8,7$  мкс составило  $\sim 150$  млн (число используемых процессоров 800). Для проведения такого же расчета с учетом модели кинетики детона-



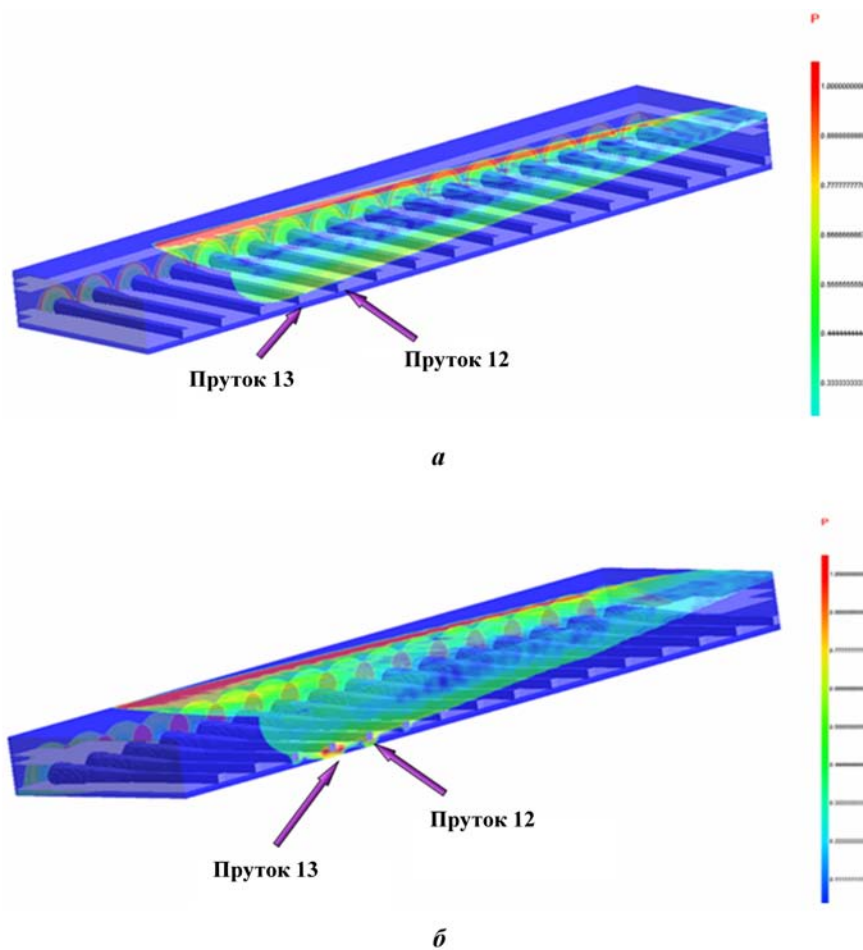


Рис. 11. Распределение давления в оргстекле:  $a - t = 5,5 \text{ мкс}$ ;  $б - t = 7 \text{ мкс}$

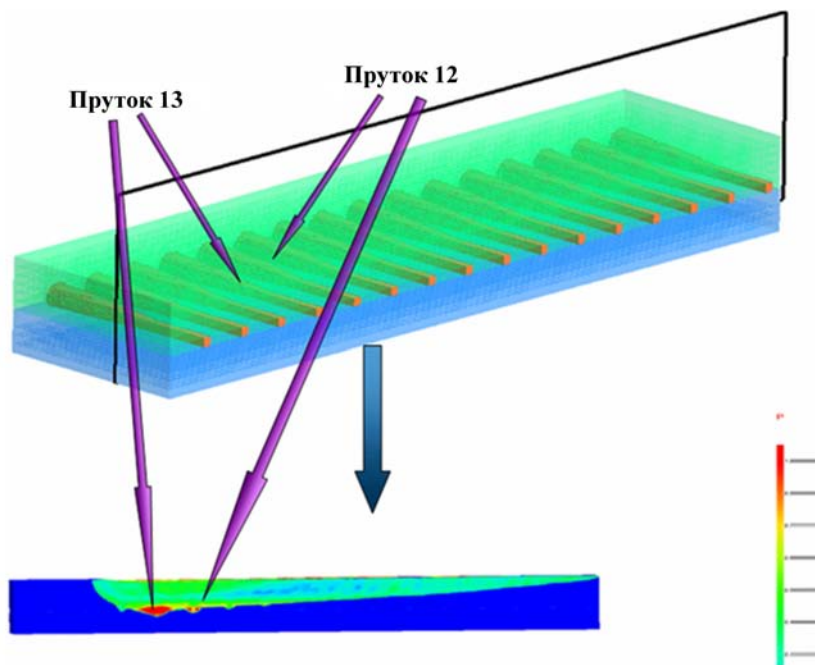


Рис. 12. Распределение давления в одном из сечений математической области задачи,  $t = 8 \text{ мкс}$

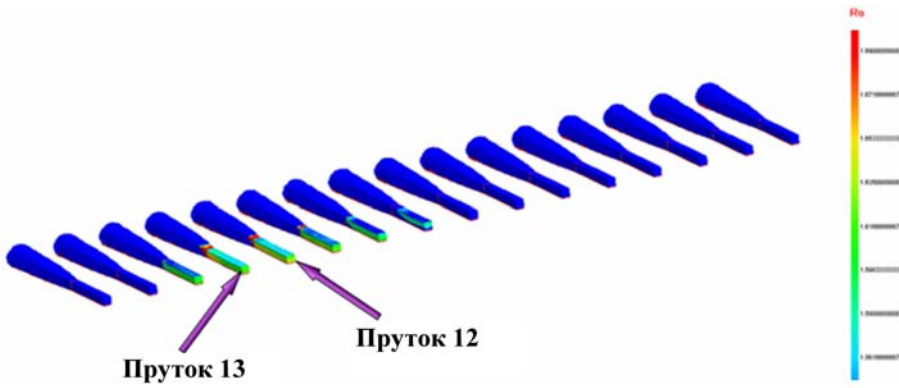


Рис. 13. Распределение плотности в прутках,  $t = 8$  мкс

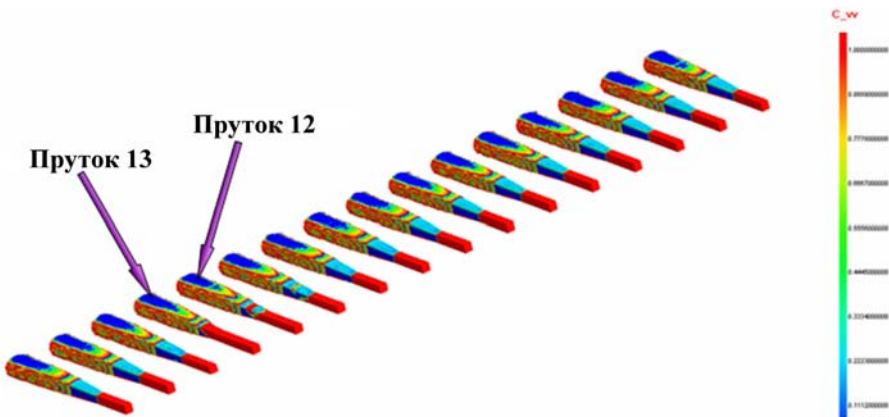


Рис. 14. Распределение концентрации невыгоревшего ВВ в прутках,  $t = 8,7$  мкс

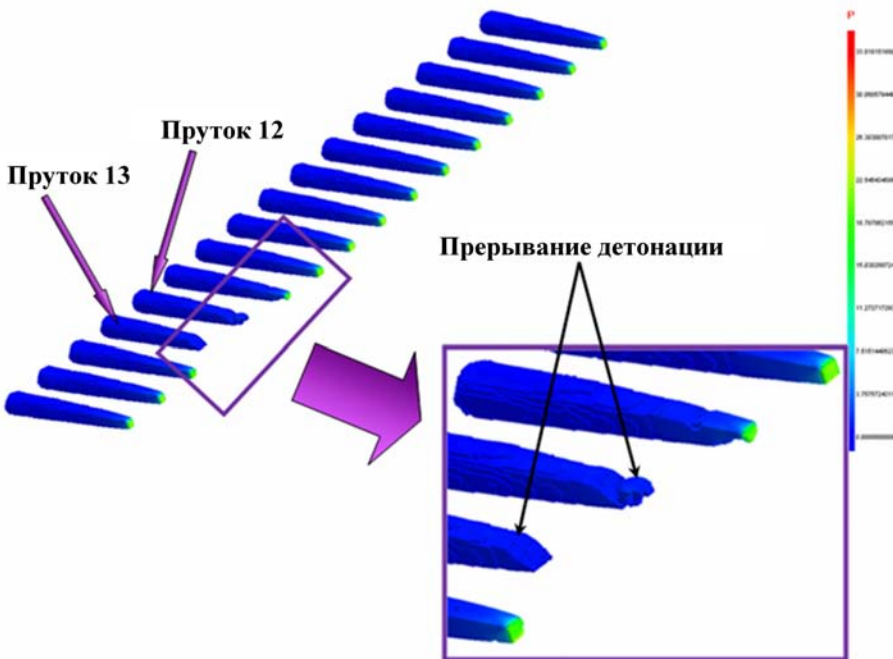


Рис. 15. Распределение давления в прутках,  $t = 8,7$  мкс

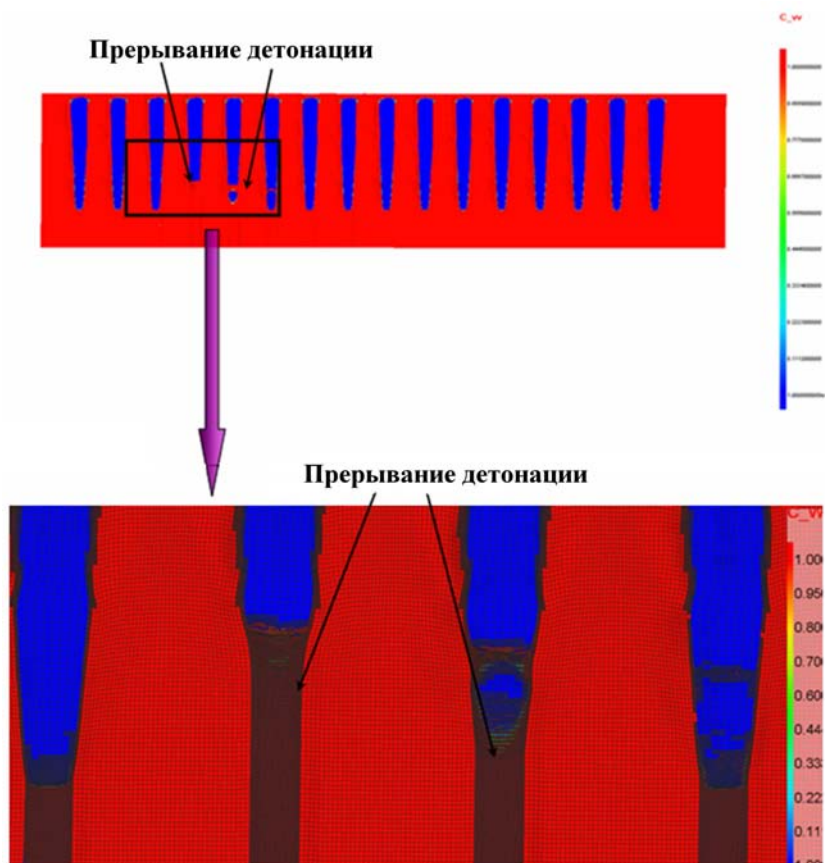


Рис. 16. Распределения концентрации невыгоревшего ВВ в одном из сечений, проходящих через прутки;  $t = 8,7$  мкс

ции, но без использования встроенных сеток потребовалось бы около 4 млрд счетных ячеек и не менее 20 000 процессоров. Это свидетельствует о том, что разработанная и реализованная методика является очень экономичной по отношению к требуемым вычислительным ресурсам.

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 в качестве инструмента подробного анализа внутренней структуры процесса.

### Список литературы

1. Лисейкин В. Д. Обзор методов построения структурных адаптивных сеток // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1996. Т. 36, № 1. С. 3–41.
2. Муругова О. О., Чернышёв Ю. Д. Численный метод решения уравнений газодинамики на адаптивной лагранжевой сетке в комплексе программ Д // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 1. С. 61–67.
3. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // Там же. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
4. Бабанов А. В., Змушко В. В., Рыбаченко П. В., Большакова А. Э. Программа МАДС++ расчета задач механики сплошной среды на адаптивно-встраиваемой сетке // Там же. Вып. 4. С. 55–60.
5. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е. и др. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ //

- Химическая физика. 1995. Т. 14, № 2–3. С. 32–39.
6. Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриева Л. В. и др. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.
7. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997.
8. Копышев В. П. О простейшем уравнении состояния твердых тел // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2002. Вып. 1–2. С. 4–8.

Статья поступила в редакцию 11.08.14.

NUMERICAL MODELING OF THE DETONATION PROCESS IN 3D SPACE USING ADAPTIVE-IN-BUILT LAGRANGIAN GRID IN THE “D” TECHNIQUE / L. A. Andreevskih, I. M. Epishkov, N. V. Korepova, D. M. Linnik, O. O. Murugova, V. B. Titova, Yu. D. Chernyshev (FSUE RFNC-VNIIEF, Sarov, Nizhny Novgorod region).

The paper describes the calculation technique for 3D gas-dynamics problems on adaptive-in-built Lagrangian grids. The essence of solving the gas-dynamics problems using adaptive-in-built grids is in the reduction of the initial grid cells in the course of the simulation in local areas with high gradients of gas-dynamic quantities. The paper briefly considers the algorithms of the use of adaptive-in-built grids as applied to the Lagrangian “D” technique, and the results of the numerical simulation of one experiment for the determination of the weak shock effect on the detonation propagation in high-explosive rods based on heating coil using the described technique.

*Keywords:* 3D Lagrangian “D” technique, gas dynamics, Morozov-Karpenko detonation kinetics, adaptive-in-built Lagrangian grid.

---