

УДК 519.6

## АЛГОРИТМ ИТЕРАЦИОННОЙ КОРРЕКЦИИ ВРЕМЕН ДЕТОНАЦИИ ЗА СЧЕТ УЧЕТА НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В МЕТОДИКЕ "ЛЭГАК"

Н. А. Володина, С. А. Краюхин  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Приводится описание нескольких методов повышения точности базового пошагового алгоритма расчета идеальной детонации ВВ в методике ЛЭГАК. Основное внимание уделено алгоритму итерационной коррекции времен инициирования ВВ за счет учета направления движения детонационной волны. Для демонстрации применимости алгоритма приведены результаты расчетов нескольких методических задач по распространению детонационной волны в ВВ.

*Ключевые слова:* взрывчатое вещество, идеальная детонация, время инициирования детонации, скорость распространения детонационной волны, фронт детонационной волны.

### Введение

В методике ЛЭГАК [1] для моделирования процесса распространения идеальной детонации используются два типа алгоритмов: геометрические и пошаговые.

Для геометрических алгоритмов положение фронта детонации на каждый момент времени определяется исходя из начального положения инициирования. То есть исходной посылкой для построения алгоритмов контроля скорости детонации такого типа является задание той или иной поверхности инициирования ВВ, от которой происходит дальнейшее распространение детонационной волны (ДВ) с постоянной скоростью.

Так называемые пошаговые алгоритмы расчета идеальной детонации основаны на принципе Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой дошла ДВ, становится источником распространения вторичной ДВ, а огибающая этих волн дает положение фронта детонации в следующий момент времени. К преимуществам пошаговых алгоритмов по сравнению с геометрическими можно отнести то, что они позволяют проводить расчеты систем с достаточно сложной геометрией и учитывать изменение формы ВВ за счет газодинамических воздействий.

Пошаговые алгоритмы также можно разделить на два класса: точные и приближенные.

Особенностью точных пошаговых алгоритмов является хранение в некотором виде информации о точках, которые являются источниками волн, для точного расчета времен детонации. Реализация точного пошагового алгоритма является отдельной сложной задачей и в данной статье не рассматривается. Детальное описание точного пошагового алгоритма приведено в [2].

В приближенных пошаговых методах для анализа времен детонации в сдетонировавших узлах задается область влияния — окрестность фиксированного размера. Небольшой размер данной окрестности (2—3 сеточных узла) дает недостаточную точность вычислений, а повышение точности за счет увеличения количества рассматриваемых точек приводит к существенному снижению производительности. Выходом из данной ситуации является алгоритм коррекции времен детонации за счет учета направления движения ДВ, который позволяет существенно повысить точность пошагового алгоритма без серьезного увеличения вычислительной нагрузки. Описанию алгоритма коррекции времен детонации, реализованного в методике ЛЭГАК, посвящена данная статья.

### Базовый пошаговый алгоритм расчета идеальной детонации в методике ЛЭГАК

Базовым пошаговым алгоритмом расчета идеальной детонации в методике ЛЭГАК будем называть приближенный пошаговый алгоритм, суть которого заключается в том, что время прихода детонации в узел счетной сетки можно рассчитать по скорости ДВ и временам детонации в узлах некоторой окрестности влияния.

Для реализации этого алгоритма в структуру данных методики ЛЭГАК был введен массив времен прихода ДВ в узлы счетной сетки. В начальный момент времени в каждый элемент массива заносится большое число, заведомо большее полного времени расчета ( $10^6$ ).

Для каждого узла, для которого нужно определить время прихода волны, время определяется по формуле  $t_d = \min \left( t_d^j + \frac{dist^j}{D} \right)$ , где  $t_d^j$  — время детонации узла-источника  $j$ ;  $dist^j$  — расстояние от данного узла до узла  $j$ ;  $D$  — скорость распространения детонации;  $j$  — индекс узла в окрестности  $2^*$  от данного узла. Данный размер окрестности влияния обусловлен размером пересечения сеточных фрагментов при многопроцессорном счете в методике ЛЭГАК.

В трехмерном случае расчетная ячейка представляет собой шестигранник с восемью вершинами — узлами счетной сетки. Определение времен прихода ДВ  $t_d$  производится на каждом временном шаге только для узлов тех ячеек ВВ, которые содержат от 1 до 7 уже сдетонировавших узлов. Если сдетонировавших узлов нет или, наоборот, все узлы уже сдетонировали, то времена детонации в узлах данной ячейки не определяются. Использование такого подхода уменьшает количество ячеек, в которых будут определяться времена детонации, что существенно сокращает время выполнения программы.

Далее по вычисленным временам прихода ДВ определяются точки пересечения ребер счетных ячеек с поверхностью фронта ДВ. Затем для каждой такой ячейки определяется ее часть, которая находится за фронтом ДВ, и вычисляется отношение объема многогранника, отсекаемого фронтом ДВ, к объему ячейки, т. е. находятся концентрации продуктов взрыва (ПВ) в данной ячейке.

\*Здесь и далее *окрестность N* означает окрестность влияния размером в  $N$  сеточных узлов.

При анализе времен детонации в соседних узлах счетной сетки в базовом алгоритме пошаговой детонации используется окрестность из двух узлов. Это приводит к тому, что детонация на квадратных (кубических) сетках распространяется не по прямой, а по ломаной (за исключением углов  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$  к линиям сетки). На рис. 1 приведен путь распространения детонации по базовому алгоритму пошаговой детонации в сравнении с аналитическим путем.

Для повышения точности определения времен прихода ДВ в методике ЛЭГАК была разработана возможность увеличения размера окрестности влияния. В данном алгоритме для каждого узла, для которого нужно определить время прихода ДВ, это время определяется по той же формуле  $t_d = \min \left( t_d^j + \frac{dist^j}{D} \right)$ , однако индекс узла  $j$  изменяется в окрестности  $r$  данного узла ( $r$  — число, задаваемое пользователем).

Так как стандартно в методике ЛЭГАК пересечение сеточных фрагментов при многопроцессорном счете равно двум ячейкам, то для правильности расчета времен детонации на границах фрагментов счетной сетки при многопроцессорном счете было необходимо увеличить пересечение областных массивов для программы детонации до размера окрестности  $r$ . Для решения этой задачи также была реализована подпрограмма создания новых фрагментов с необходимым (произвольным) количеством ячеек в пересечении при использовании алгоритма пошаговой детонации с увеличенным размером окрестности влияния.

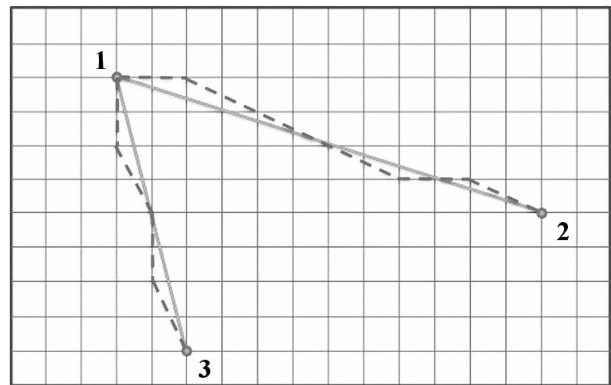


Рис. 1. Пути распространения детонации: - - - - по базовому алгоритму пошаговой детонации; — — — аналитический путь; 1 — точка инициирования; 2, 3 — узлы, в которых рассчитывается время детонации

Очевидно, что чем больше окрестность влияния, тем точнее рассчитываются времена детонации, однако при этом существенно возрастает вычислительная нагрузка, что является главным недостатком пошагового алгоритма с увеличенной окрестностью.

Также для алгоритма пошаговой детонации с увеличенным размером окрестности влияния был реализован алгоритм "Инерт" для обхода инертного вещества при расчете времен прихода детонации по заданной концентрации ВВ или ПВ. Наиболее простой пример подобной ситуации представлен на рис. 2, когда прямая линия между узлами 1 и 2 пересекает инертное вещество.

В двумерном случае между узлом-источником и узлом, в котором рассчитывается время детонации, строится линия и определяется ее пересечение со сторонами ячеек, лежащими в прямоугольной окрестности построенной линии. В трехмерном случае для определения пересечения отрезка с гранями трехмерной ячейки поверхность ячейки разбивается на треугольники.

После определения пересеченных ячеек проверяется наличие в них заданной концентрации ВВ и ПВ. Если в одной из пересеченных ячеек данное условие не выполняется, узел-источник считается невидимым для узла, в котором рассчитывается время детонации.

Время выполнения алгоритма обхода инертного вещества также существенно зависит от размера окрестности, поэтому опытным путем установлено, что для приемлемого календарного времени счета двумерных задач оптимальное значение размера окрестности  $r$  составляет до 6 узлов, а для трехмерных задач — только до 4 узлов.

Указанные ограничения на размер окрестности влияния привели к поиску решения, позво-

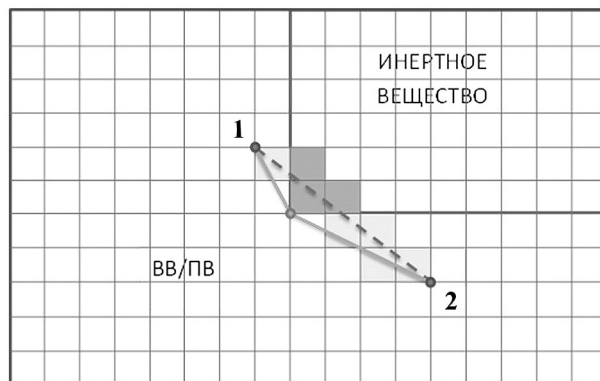


Рис. 2. Пример пересечения инертного вещества

ляющего повысить точность пошагового алгоритма без увеличения вычислительной нагрузки. Подходящим решением оказалась идея учета направления движения фронта ДВ.

### Алгоритм итерационной коррекции времен детонации в методике ЛЭГАК

Алгоритм итерационной коррекции времен детонации в методике ЛЭГАК основан на идее учета направления распространения ДВ [3], которая успешно реализована в подобном алгоритме методики ТИМ [4]. Если в стандартном пошаговом алгоритме находится минимальное время детонации узла от одного из соседних, уже сдетонировавших узлов, то процедура коррекции позволяет найти точку-источник с минимальным временем прихода детонации внутри ячейки, проведя интерполяцию по временам детонации из нескольких узлов.

Алгоритм метода коррекции поясним с помощью рис. 3.

Пусть нужно вычислить время детонации в точке  $P_0$  по временам в точках  $P_1$  и  $P_2$ . Зная времена детонации в точках  $P_1$  и  $P_2$  и считая, что изменение времени от  $P_1$  к  $P_2$  происходит линейно, можно определить времена прихода ДВ во все точки отрезка  $P_1P_2$  линейной интерполяцией. Взяв за параметр расстояние  $|P_1S|$ , где  $S$  — произвольная точка на отрезке  $P_1P_2$ , и найдя минимум по этому параметру функции  $t_S + \frac{|P_0S|}{D}$ , где  $D$  — скорость детонации,  $t_S$  — время детонации в точке  $S$ , скорректируем время прихода ДВ от данной пары ячеек. В трехмерном случае алгоритм выглядит аналогично: вместо пары точек  $P_1$  и  $P_2$  с известными временами детонации используются три точки, образующие треуголь-

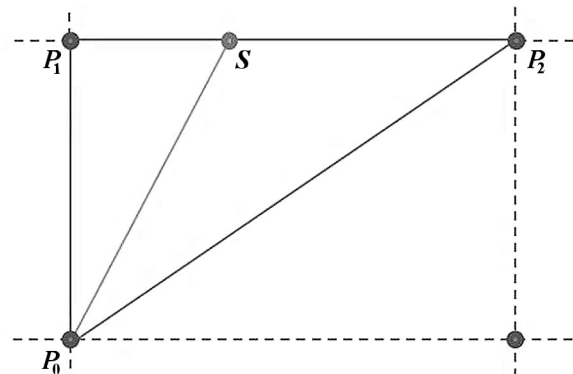


Рис. 3. Фрагмент двумерной счетной сетки

ник, внутри которого времени можно определить линейной интерполяцией. Однако в трехмерном случае сильно возрастает сложность минимизации функции  $t_S + \frac{|P_0S|}{D}$  и данная реализация (назовем ее аналитической коррекцией) может привести к существенному снижению производительности.

Поскольку высокая производительность для методики ЛЭГАК является существенным фактором, было решено не минимизировать указанную функцию, а организовать итерационный процесс, используя несколько вспомогательных точек внутри зоны интерполяции.

В двумерном случае на отрезке  $P_1P_2$  необходимо определить координаты трех дополнительных точек (рис. 4): точка  $P_3$  — середина отрезка  $P_1P_2$ , точка  $P_4$  — середина отрезка  $P_1P_3$ , точка  $P_5$  — середина отрезка  $P_3P_2$ .

Так как изменение времени детонации на отрезке происходит линейно, время детонации в любой точке  $P_n$  отрезка  $P_1P_2$  можно выразить следующим образом:

$$t_{P_n} = \alpha t_{P_1} + \beta t_{P_2}.$$

Коэффициенты  $\alpha, \beta$  можно получить, решив систему уравнений

$$\begin{aligned} X_{P_n} &= \alpha X_{P_1} + \beta X_{P_2}; \\ Y_{P_n} &= \alpha Y_{P_1} + \beta Y_{P_2}. \end{aligned}$$

Однако данные точки выбраны не случайно, для них определить коэффициенты  $\alpha, \beta$  можно без решения системы уравнений. Так, для точки  $P_3$   $\alpha = 1/2, \beta = 1/2$ . Для точки  $P_4$   $\alpha = 3/4, \beta = 1/4$ . Для точки  $P_5$   $\alpha = 1/4, \beta = 3/4$ .

После вычисления коэффициентов и времени инициирования детонации в точках  $P_n$  находим время детонации в точке  $P_0$ :

$$t_{P_0} = t_{P_n} + \frac{|P_0P_n|}{D}.$$

Затем находим минимальное значение  $t_{P_0}$ , которое и является уточненным временем прихода ДВ в точку  $P_0$ . При необходимости две точки,

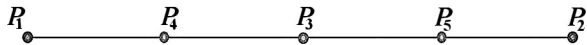


Рис. 4. Разбиение отрезка в двумерном случае

для которых  $t_{P_0}$  минимально, принимаем за  $P_1$  и  $P_2$  и повторяем итерацию.

Алгоритм итерационной коррекции времени детонации в трехмерном случае выполняется аналогичным образом. Рассмотрим фрагмент трехмерной кубической счетной сетки (рис. 5) с узлом  $P_0$ , у которого как минимум в трех соседних узлах  $P_1, P_2$  и  $P_3$  известно время детонации.

Если в базовом пошаговом алгоритме время инициирования для узла  $P_0$  ищется от одного из узлов в некоторой окрестности, то в алгоритме итерационной коррекции минимальное время инициирования данной ячейки ищется при последовательном рассмотрении троек соседних узлов. Необходимо определить время прихода ДВ в точку  $P_0$ .

Последовательно перебирая тройки соседних узлов (всего их 96), находим тройку узлов  $P_1, P_2$  и  $P_3$ , в которых известно время детонации. В каждом треугольнике  $P_1P_2P_3$ , образованном тремя соседними узлами с известными временами детонации, необходимо вычислить координаты 16 дополнительных точек (рис. 6): точки  $P_4$ – $P_6$  — середины сторон треугольника;  $P_7$  — точка пересечения медиан треугольника, или центр масс;  $P_8$ – $P_{13}$  — середины отрезков между вершинами и серединами сторон треугольника;  $P_{14}$ – $P_{19}$  — середины отрезков между вершинами или серединами сторон и центром масс треугольника.

Так как изменение времени детонации в треугольнике происходит линейно, время детонации в любой точке  $P_n$  треугольника  $P_1P_2P_3$  можно выразить следующим образом:

$$t_{P_n} = \alpha t_{P_1} + \beta t_{P_2} + \gamma t_{P_3}.$$

Коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$  можно получить, решив систему уравнений

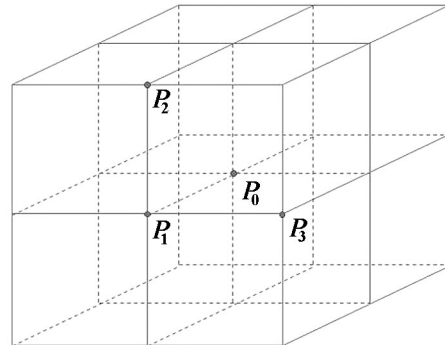


Рис. 5. Фрагмент трехмерной кубической счетной сетки

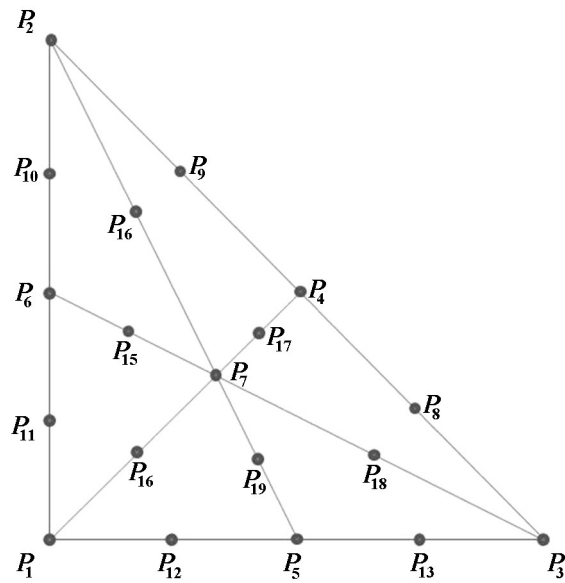


Рис. 6. Схема разбиения треугольника

$$\begin{aligned} X_{P_n} &= \alpha X_{P_1} + \beta X_{P_2} + \gamma X_{P_3}; \\ Y_{P_n} &= \alpha Y_{P_1} + \beta Y_{P_2} + \gamma Y_{P_3}; \\ Z_{P_n} &= \alpha Z_{P_1} + \beta Z_{P_2} + \gamma Z_{P_3}. \end{aligned}$$

Решение такой системы для 16 точек в каждом треугольнике — достаточно затратная операция с точки зрения производительности. Однако данные точки выбраны не случайно, для них определить коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  можно без решения системы уравнений. Так, например, для точки  $P_7$   $\alpha = 1/3$ ,  $\beta = 1/3$ ,  $\gamma = 1/3$ ; для точки  $P_5$   $\alpha = 1/2$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 1/2$ ; для  $P_8$   $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1/4$ ,  $\gamma = 3/4$ .

Для точек  $P_{14}$ – $P_{19}$  времена также находим, считая, что изменение времени детонации между центром масс и точками  $P_1$ – $P_6$  происходит линейно. Подбор коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  производится аналогично.

После вычисления коэффициентов и времен инициирования детонации в точках  $P_n$  находим время детонации в точке  $P_0$ :

$$t_{P_0} = t_{P_n} + \frac{P_0 P_n}{D}.$$

Затем находим минимальное значение  $t_{P_0}$ , которое и является уточненным временем прихода ДВ в точку  $P_0$ . При необходимости три точки, для которых  $t_{P_0}$  минимально, принимаем за  $P_1$ – $P_3$  и повторяем итерацию.

По сравнению с методом уточнения, основанным на аналитической коррекции, пошаговый

алгоритм с итерационной коррекцией достаточно прост в реализации для трехмерного случая и имеет хорошую производительность в сравнении с базовым алгоритмом для увеличенной окрестности влияния.

### Результаты методических расчетов

В данном разделе приведены результаты расчетов нескольких методических задач. Сравниваются точность разработанных алгоритмов и время их выполнения.

**Задача 1.** Задача имеет двумерную геометрию. Сферическая ДВ распространяется в квадратной области  $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  из центральной точки  $(5 \text{ см}, 5 \text{ см})$ . Область заполнена ВВ с постоянной скоростью распространения ДВ  $D = 8,83 \text{ км/с}$ . Сетка прямоугольная с размером ячеек  $0,01 \text{ см} \times 0,02 \text{ см}$ , всего  $0,5$  млн сеточных узлов. Прямоугольная сетка выбрана специально для исследования погрешности на вытянутых сетках.

На рис. 7 представлено сравнение формы фронтов сферической ДВ на момент времени  $t = 5 \text{ мкс}$  для базового пошагового алгоритма с различными размерами окрестности влияния.

На рис. 8, 9 приведены погрешности определения времен инициирования детонации относительно точного значения, полученного аналитически, при достижении фронтом верхней и правой границ области.

На рис. 10 представлено сравнение формы фронтов сферической ДВ на момент времени  $t = 5 \text{ мкс}$  для пошагового алгоритма с итерационной коррекцией (3 итерации) и аналитической коррекцией времен детонации.

На рис. 11, 12 приведено сравнение погрешностей определения времен инициирования детонации при достижении фронтом верхней и правой границ области для базового алгоритма с окрестностью 4 и алгоритма с итерационной коррекцией (3 итерации).

На рис. 13, 14 демонстрируется сходимость итерационного процесса.

В табл. 1 приведены максимальные погрешности определения времен инициирования детонации при достижении фронтом верхней и правой границ области для всех методов.

В табл. 2 представлено сравнение времен выполнения всех реализованных алгоритмов для данной задачи.

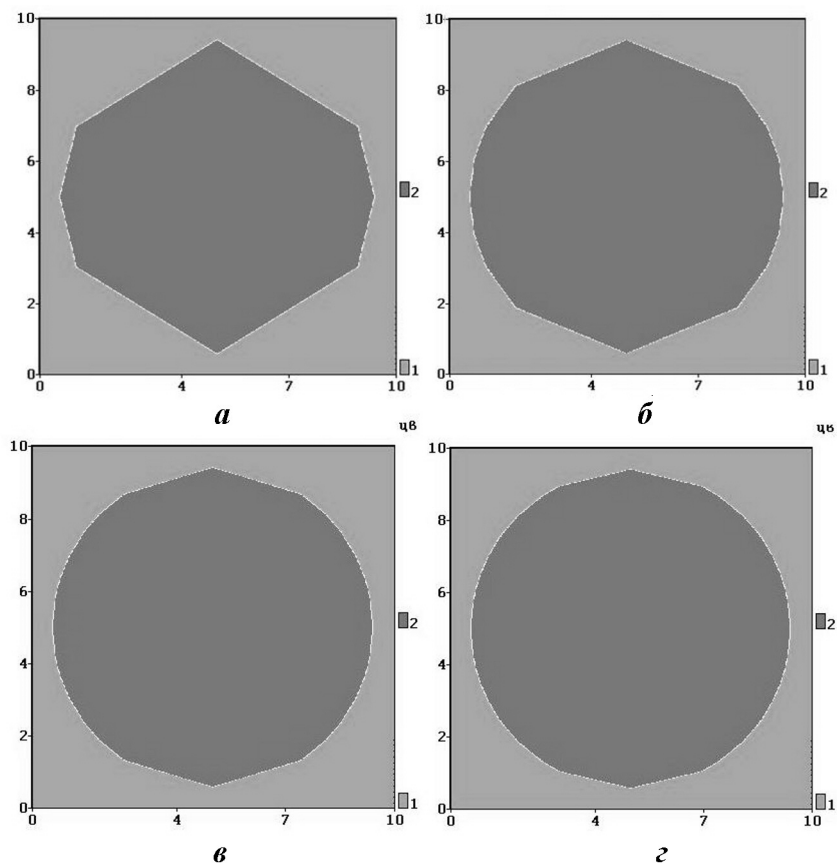


Рис. 7. Задача 1. Фронт сферической ДВ на момент времени  $t = 5$  мкс для базового пошагового алгоритма с различными размерами окрестности влияния: *a* — окрестность 1; *б* — окрестность 2; *в* — окрестность 3; *г* — окрестность 4

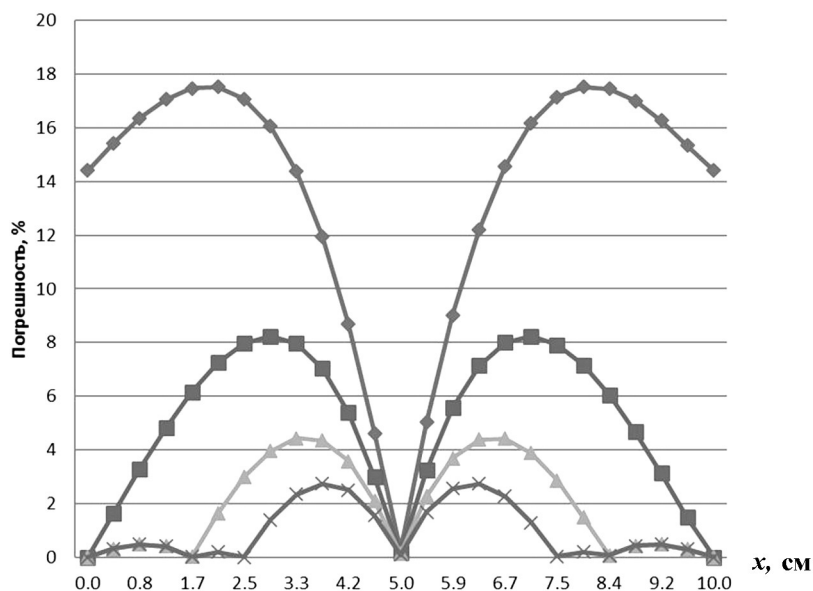


Рис. 8. Задача 1. Сравнение погрешностей на верхней границе области для базового алгоритма с различными размерами окрестности влияния: —♦— — окрестность 1; —■— — окрестность 2; —▲— — окрестность 3; —×— — окрестность 4

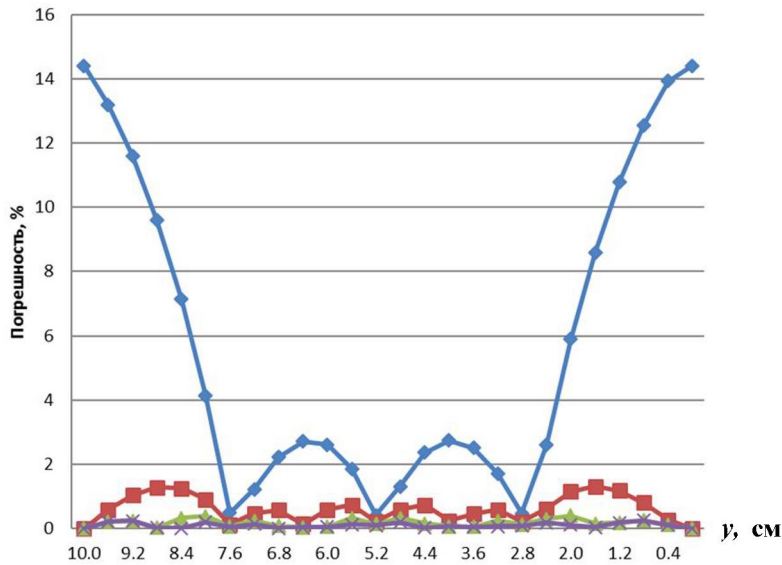


Рис. 9. Задача 1. Сравнение погрешностей на правой границе области для базового алгоритма с различными размерами окрестности влияния: —♦— окрестность 1; —■— окрестность 2; —▲— окрестность 3; —×— окрестность 4

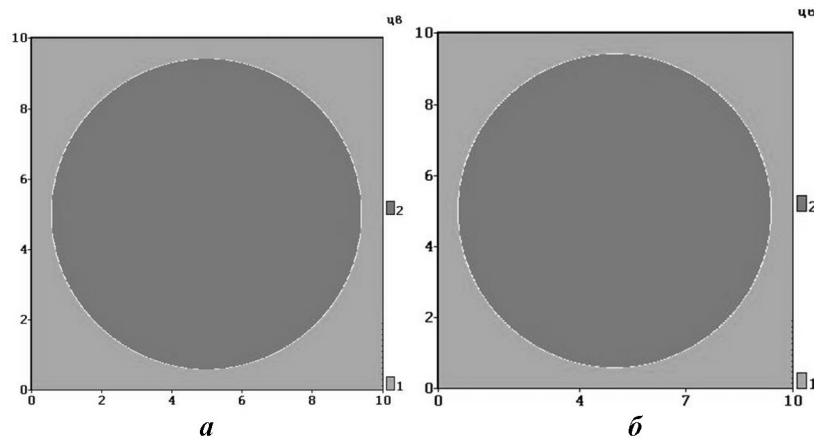


Рис. 10. Задача 1. Фронт сферической ДВ на момент времени  $t = 5$  мкс для окрестности 1 с аналитической (а) и итерационной (б) коррекцией времен детонации

Таблица 1

**Максимальные погрешности определения времен детонации в задаче 1**

Алгоритм	Максимальная погрешность, %
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 1	17,55
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 2	8,23
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 3	4,48
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 4	2,75
Алгоритм с аналитической коррекцией	0,25
Алгоритм с итерационной коррекцией, 1 итерация	2,74
Алгоритм с итерационной коррекцией, 2 итерации	0,32
Алгоритм с итерационной коррекцией, 3 итерации	0,269
Алгоритм с итерационной коррекцией, 10 итераций	0,267

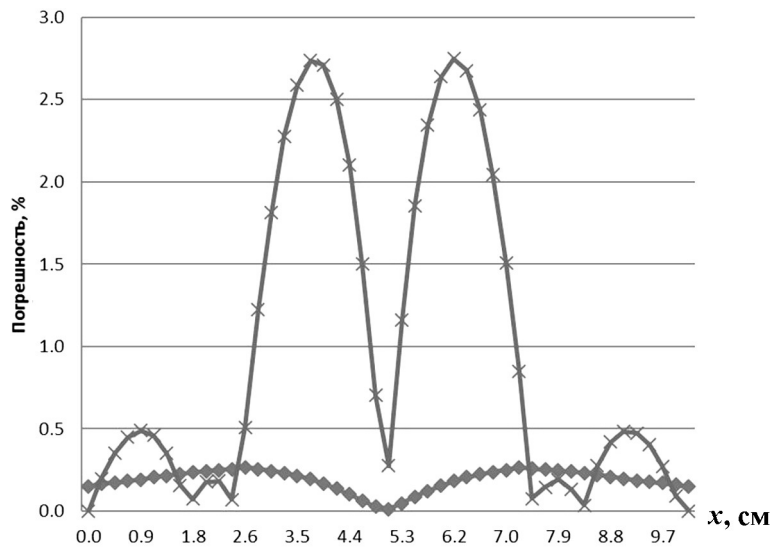


Рис. 11. Задача 1. Сравнение погрешностей для базового алгоритма с окрестностью 4 (—x—) и алгоритма с итерационной коррекцией (—♦—) на верхней границе области

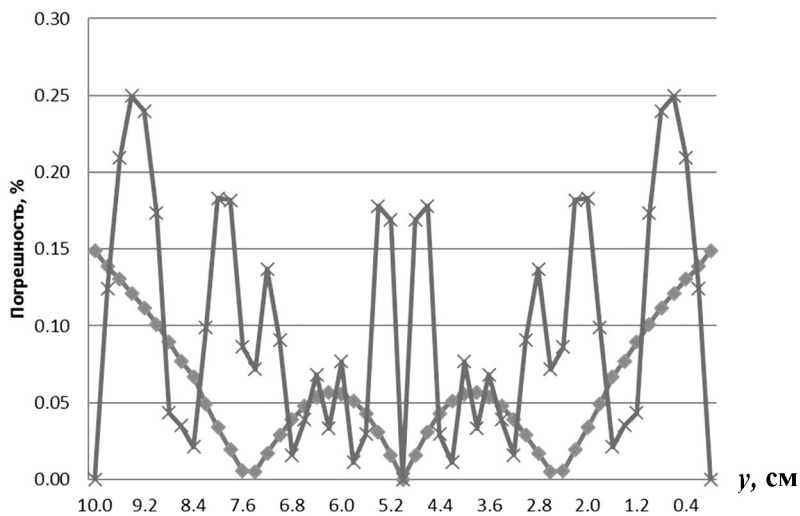


Рис. 12. Задача 1. Сравнение погрешностей для базового алгоритма с окрестностью 4 (—x—) и алгоритма с итерационной коррекцией (—♦—) на правой границе области

Таблица 2

**Времена выполнения алгоритмов для задачи 1**

Алгоритм	Время, с
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 1	47,5
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 2	47,7
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 3	49,3
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 4	51,2
Алгоритм с аналитической коррекцией	47,6
Алгоритм с итерационной коррекцией, 1 итерация	48,0
Алгоритм с итерационной коррекцией, 2 итерации	48,1
Алгоритм с итерационной коррекцией, 3 итерации	48,9



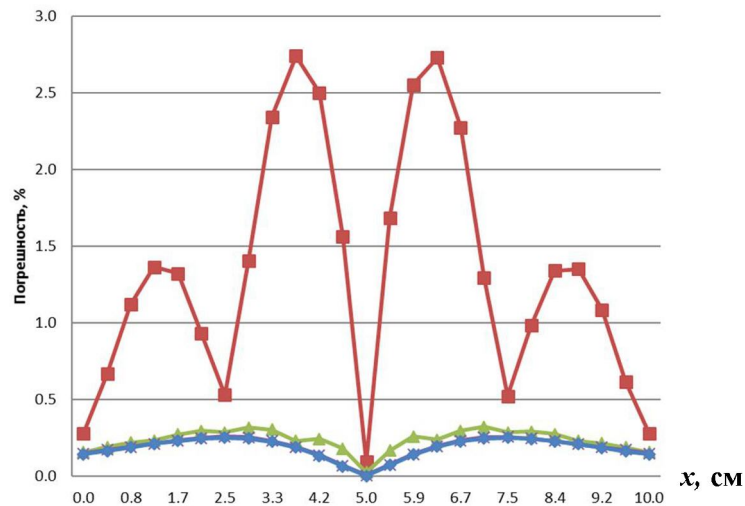


Рис. 13. Задача 1. Сходимость итерационного процесса на верхней границе области: —■— — итерационная коррекция, 1 итерация; —▲— — итерационная коррекция, 2 итерации; —×— — итерационная коррекция, 3 итерации; —◆— — аналитическая коррекция

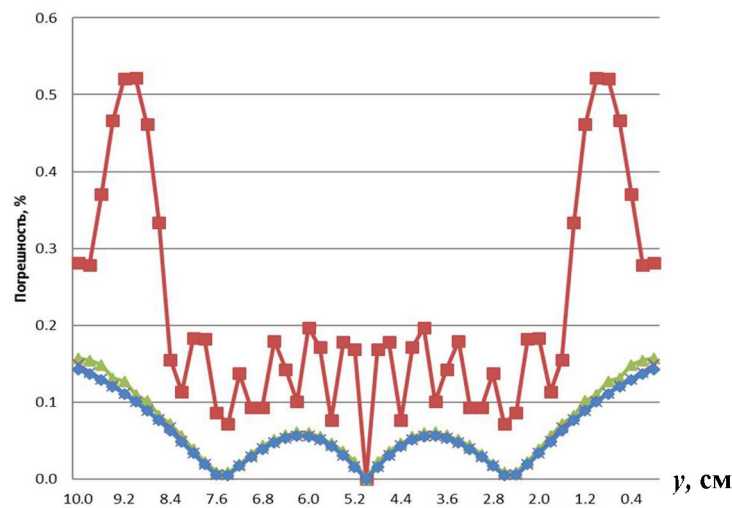


Рис. 14. Задача 1. Сходимость итерационного процесса на правой границе области: —■— — итерационная коррекция, 1 итерация; —▲— — итерационная коррекция, 2 итерации; —×— — итерационная коррекция, 3 итерации; —◆— — аналитическая коррекция

**Задача 2.** Задача имеет трехмерную геометрию. Сферическая ДВ распространяется в кубической области  $10\text{ см} \times 10\text{ см} \times 10\text{ см}$  из центральной точки (5 см, 5 см, 5 см). Область заполнена ВВ с постоянной скоростью распространения ДВ  $D = 8,83\text{ км/с}$ . Сетка прямоугольная с размером ячеек  $0,05\text{ см} \times 0,1\text{ см} \times 0,1\text{ см}$ , всего 2 млн узлов.

В табл. 3 приведены максимальные погрешности определения времен инициирования детонации при достижении фронтом границ области для всех методов.

Также для данной задачи на рис. 15 приведено поле значений времен инициирования на момент времени  $t = 5\text{ мкс}$  для алгоритма с итерационной коррекцией (3 итерации), полученное при помощи системы графической и численной обработки данных ScientificView [5]. Визуально фронт ДВ имеет идеальную сферическую форму.

В табл. 4 представлено сравнение времен выполнения всех реализованных алгоритмов для данной задачи.

Таблица 3

Максимальные погрешности определения времен детонации в задаче 2

Алгоритм	Максимальная погрешность, %
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 1	17,1
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 2	4,6
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 3	2,8
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 4	1,4
Алгоритм с итерационной коррекцией, 1 итерация	1,6
Алгоритм с итерационной коррекцией, 2 итерации	1,2
Алгоритм с итерационной коррекцией, 3 итерации	1,1
Алгоритм с итерационной коррекцией, 10 итераций	1,1

Таблица 4

Времена выполнения алгоритмов для задачи 2

Алгоритм	Время, с
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 1	13,3
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 2	15,4
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 3	30,7
Базовый пошаговый алгоритм, окрестность 4	73,4
Алгоритм с итерационной коррекцией, 1 итерация	22,3
Алгоритм с итерационной коррекцией, 2 итерации	27,3
Алгоритм с итерационной коррекцией, 3 итерации	32,6

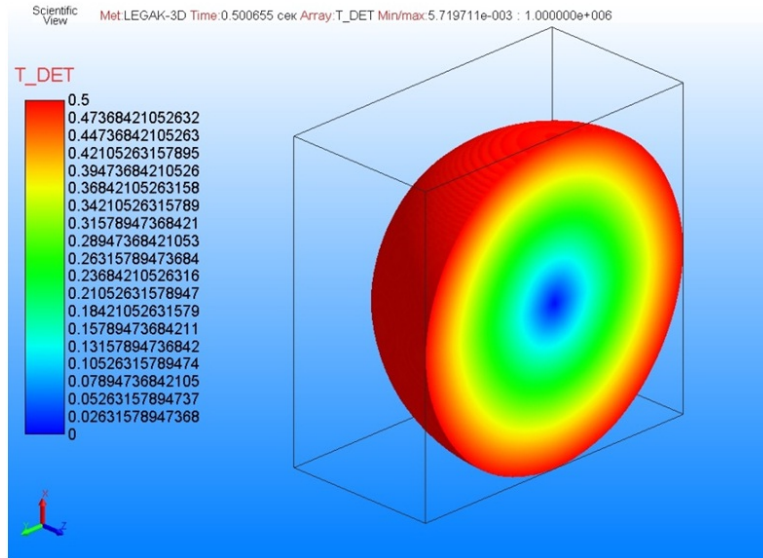


Рис. 15. Задача 2. Поле значений времен инициирования детонации на момент времени  $t = 5$  мкс

**Задача 3.** Задача имеет двумерную геометрию. В области радиусом 30 см из крайней точки (30 см, 0) в начальный момент времени распространяется ДВ. В центре области находится инертное вещество радиусом  $R = 9$  см, остальное пространство счетной области заполнено ВВ

с постоянной скоростью распространения детонации  $D = 7,6$  км/с. Задана сферическая расчетная сетка, состоящая из 250 тыс. узлов.

На рис. 16 представлены положения фронта ДВ на моменты времени  $t = 25$  мкс и  $t = 50$  мкс для базового пошагового алгоритма с окрестно-

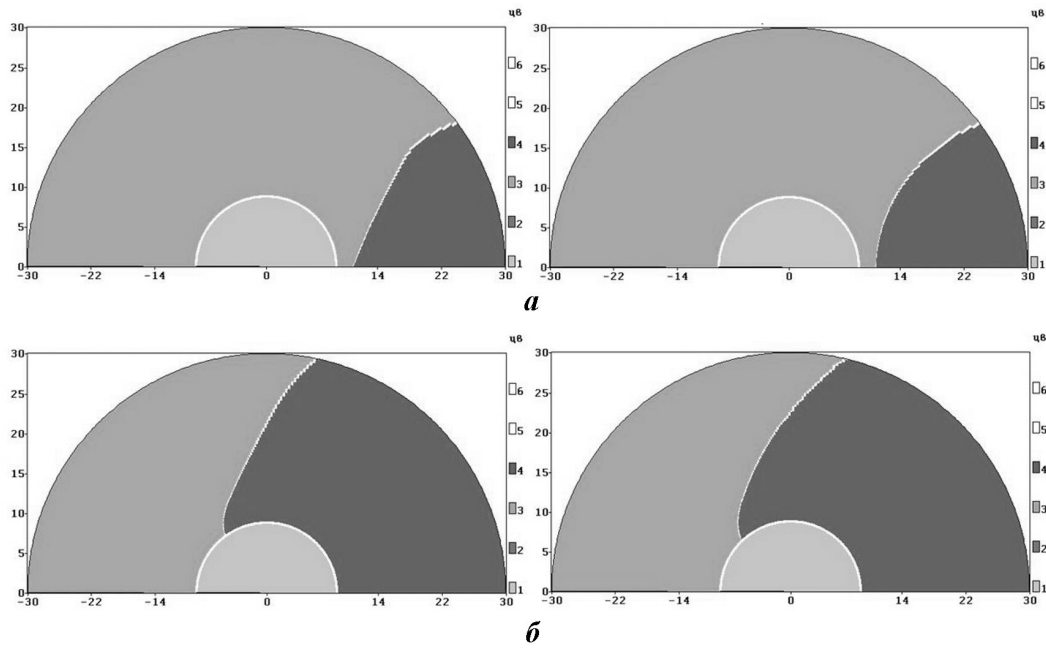


Рис. 16. Задача 3. Фронт ДВ для базового алгоритма с окрестностью 4 (слева) и алгоритма с итерационной коррекцией (справа):  $a - t = 25 \text{ мкс}$ ;  $б - t = 50 \text{ мкс}$

стью 4 и алгоритма с итерационной коррекцией (3 итерации). Как видно из рисунков, для базового пошагового алгоритма на сферических сетках характерна ступенчатость фронта (даже с большим размером окрестности) в отличие от алгоритма с итерационным уточнением.

На рис. 17 представлены графики погрешностей определения времен детонации на внутренней границе ВВ для различных алгоритмов. За точное решение взяты времена детонации, полученные с помощью точного геометрического алгоритма. Результаты получены с помощью опре-

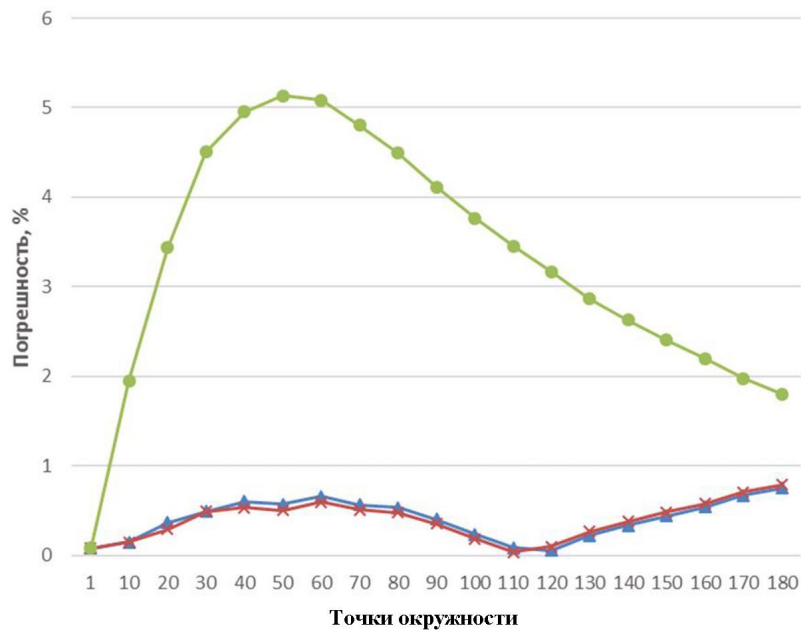


Рис. 17. Задача 3. Погрешность времен детонации на внутренней границе ВВ:  $\text{—}\blacktriangle\text{—}$  — итерационная коррекция;  $\text{—}\times\text{—}$  — аналитическая коррекция;  $\text{—}\bullet\text{—}$  — базовый алгоритм, окрестность 4

деления времен прихода УВ на набор из 180 точек на половине окружности (номер точки соответствует углу в градусах) радиусом  $R = 9$  см.

Максимальная погрешность определения времен детонации в данном расчете для базового алгоритма с окрестностью 4 составила 5,16 %, для алгоритма с итерационной коррекцией — 0,75 %, для алгоритма с аналитической коррекцией — 0,79 %.

Дальнейшее увеличение числа итераций не дает существенного уменьшения погрешности определения времен детонации на всех тестовых задачах и приводит к снижению производительности.

### Заключение

В данной статье описана реализация алгоритма итерационной коррекции времен детонации за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК для двумерного и трехмерного случаев.

Приведенные результаты методических расчетов позволяют сделать вывод о хорошей точности предложенного алгоритма, его высокой эффективности и простоты реализации. Данный алгоритм позволил существенно повысить точность определения времен детонации для вытянутых и сферических сеток. Также достоинствами данного алгоритма являются его универсальность и независимость от геометрии задачи.

Следует отметить, что на момент публикации данной статьи реализованный алгоритм уже прошел полномасштабную верификацию на прикладных задачах и является основным алгоритмом для большинства двумерных и трехмерных задач, решаемых по методике ЛЭГАК.

### Список литературы

1. Бакрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бакулина Е. А., Безрукова И. Ю., Борляев В. В., Володина Н. А., Наумов А. О., Огнева Н. Э., Резцова Т. В., Резяпов А. А., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Тихонова А. П., Циберева К. В., Шанин А. А., Ширшова М. О., Шувалова Е. В. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной

памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41–50.

*Bakhrakh S. M., Velichko S. V., Spiridonov V. F., Avdeev P. A., Artamonov M. V., Bakulina E. A., Bezrukova I. Yu., Borlyayev V. V., Volodina N. A., Naumov A. O., Ogneva N. E., Rezvova T. V., Rezyapov A. A., Starodubov S. V., Taraday I. Yu., Tikhonova A. P., Tsibereva K. V., Shanin A. A., Shirshova M. O., Shuvalova E. V.* Metodika LEGAK-3D rascheta trekhmernykh nestatsionarnykh techeniy mnogokomponentnoy sploshnoy sredy i printsipy ee realizatsii na mnogoprotsessornykh EVM s raspredelennoy pamyatyu // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2004. Vyp. 4. S. 41–50.

2. Курюхина М. Н., Наумов А. О. Модификация двумерного алгоритма расчета идеальной детонации в методике ЛЭГАК на основе принципа Гюйгенса // Молодежь в науке: сб. докл. XVI науч.-тех. конф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018. Т. 1. С. 92–98.  
*Kiryukhina M. N., Naumov A. O.* Modifikatsiya dvumernogo algoritma rascheta idealnoy detonatsii v metodike LEGAK na osnove printsipa Gyuygensa // Molodezh v nauke: sb. dokl. XVI nauch.-tekh. konf. Sarov: RFYaTs-VNIEF. 2018. T. 1. S. 92–98.
3. Соколов С. С., Мотлохов В. Н., Пушкарев А. А. Алгоритмы контроля скорости детонации в методике ТИМ-2D // Молодежь в науке: сб. докл. VI науч.-тех. конф. 2008. С. 165–171.  
*Sokolov S. S., Motlokhov V. N., Pushkarov A. A.* Algoritmy kontrolya skorosti detonatsii v metodike TIM-2D // Molodezh v nauke: sb. dokl. VI nauch.-tekh. konf. 2008. S. 165–171.
4. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соболев И. В., Ялозо А. В. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 3. С. 37–52.  
*Sokolov S. S., Panov A. I., Voropinov A. A., Novikov I. G., Sobolev I. V., Yalozo A. V.* Me-

todika TIM rascheta trekhmernykh zadach mekhaniki sploshnykh sred na nestruturirovannykh mnogogrannykh lagranzhevyykh setkakh // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2005. Vyp. 3. S. 37–52.

5. Потехин А. Л., Тарасов В. И., Фирсов С. А., Логинов И. В., Никитин В. А., Кузнецов М. Г., Попова Н. В., Деманова А. К., Козачек Ю. В. ScientificView — параллельная система пост-обработки результатов, полученных при численном моделировании физических процессов // Там же. 2008.

Вып. 4. С. 37–45.

Potekhin A. L., Tarasov V. I., Firsov S. A., Loginov I. V., Nikitin V. A., Kuznetsov M. G., Popova N. V., Demanova A. K., Kozachek Yu. V. ScientificView — parallelnaya sistema post-obrabotki rezultatov, poluchennykh pri chislennom modelirovanii fizicheskikh protsessov // Tam zhe. 2008. Vyp. 4. S. 37–45.

Статья поступила в редакцию 04.03.19.

AN ALGORITHM OF ITERATIVELY CORRECTING DETONATION TIMES BY MEANS OF ACCOUNTING THE MOVING DETONATION WAVE DIRECTION IN "LEGAK" CODE / N. A. Volodina, S. A. Krayukhin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, N. Novgorod region).

The paper describes several methods to improve the accuracy of the basic step-by-step algorithm of computing the perfect HE detonation used in the LEGAK code. The paper is focused on the description of the algorithm of iteratively correcting the HE initiation time owing to the account for the direction of a moving detonation wave. The calculated results for several methodological problems of detonation waves propagating in HE are given to demonstrate the algorithm applicability.

*Keywords:* high-explosive, perfect detonation, detonation initiation time, a detonation wave propagation velocity, detonation wave front.

---