

УДК 544.454.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА SPH К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ С ДЕТОНАЦИЕЙ В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ

И. М. Епишков, И. В. Залялова, Д. М. Линник, С. Ю. Сулова  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Статья посвящена исследованию возможности применения классического метода SPH к моделированию процессов газовой динамики с детонацией в двумерном случае. Приводятся основные формулы метода, а также представлены результаты расчетов газодинамики с детонацией с контролем скорости детонационной волны и по модели кинетики Морозова—Карпенко. Полученные результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными и аналогичными результатами, полученными по двумерной методике Д.

*Ключевые слова:* газовая динамика, модель кинетики детонации Морозова—Карпенко, детонационная волна, метод SPH, интерполяционное ядро, сглаживающая длина.

### Введение

В последнее время среди численных алгоритмов для описания двумерных газодинамических процессов большой популярностью пользуются так называемые *бессеточные* методы. В статье рассматривается один из таких алгоритмов, а именно метод сглаженных частиц, или SPH (Smooth Particle Hydrodynamics). Метод SPH основан на свободно-лагранжевом подходе, описанном в работах [1–4], согласно которому элементы среды представляются как "размазанные" по пространству области вещества, центры масс которых двигаются по законам динамики сплошной среды.

Одними из важных, требующих моделирования физических процессов являются горение и детонация взрывчатых веществ (ВВ). Необходимость предсказания точного поведения таких материалов при различных воздействиях на содержащие их конструкции делает чрезвычайно актуальной задачу численного моделирования процессов инициирования и распространения либо затухания детонации в зависимости от условий удара. Для решения этой задачи можно использовать модели кинетики детонации. Одной из таких моделей является модель кинетики детонации Морозова—Карпенко (МК) [5]. Цель данной работы — исследование возможности применения метода SPH для численного моделирования двумерных газодинамических течений с расчетом детонации с контролем скорости и по модели кинетики МК.

### SPH-уравнения газовой динамики с детонацией

Основная идея метода состоит в дискретизации сплошной среды набором сферических частиц постоянной массы  $m_i$ . Расчетные величины аппроксимируются в частицах интегралами по области течения  $\Omega$ :

$$F(\vec{r}) = \int_{\Omega} F(\vec{r}')W(\vec{r} - \vec{r}', h)d\vec{r}' \quad (1)$$

с весовой функцией  $W(\vec{r} - \vec{r}', h)$ , аналитически дифференцируемой и обладающей свойствами нормировки и предельного перехода

$$\int_{\Omega} W(\vec{r}, h) d\vec{r} = 1; \quad \lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r}, h) = \delta(\vec{r}),$$

где  $\delta$  — функция Дирака. Сам интеграл (1) заменяется конечной суммой по частицам:

$$F(\vec{r}) = \sum_i F_i \frac{m_i}{\rho_i} W(\vec{r} - \vec{r}_i, h),$$

где  $\vec{r}_i$ ,  $m_i$ ,  $\rho_i$  — соответственно радиус-вектор, масса и плотность частицы с номером  $i$ . Отсюда градиент величины представляется следующей формулой:

$$\nabla F(\vec{r}) = \sum_i F_i \frac{m_i}{\rho_i} \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h).$$

Формула для вычисления плотности имеет вид

$$\rho(\vec{r}) = \sum_i m_i W(\vec{r} - \vec{r}_i, h),$$

что можно понимать как сглаживание масс дискретных частиц для получения непрерывного поля плотности. Весовую функцию  $W(\vec{r} - \vec{r}', h)$  называют ядром интерполяции, при этом величина  $h$  с размерностью длины является параметром интерполяции — сглаживающей длиной, с помощью которой можно регулировать "размазывание" массы частицы вокруг ее центра.

В рамках данной работы ограничимся самым распространенным вариантом интерполяционного ядра, представленного в виде В-сплайна:

$$W = \frac{1}{0,7\pi h^2} \begin{cases} 1 - 1,5R^2 + 0,75R^3, & 0 \leq R \leq 1; \\ 0,25(2 - R)^3, & 1 \leq R \leq 2; \\ 0, & R > 2, \end{cases}$$

где  $R = \frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}{h}$ .

С помощью приведенной выше процедуры можно из дифференциальной формы уравнений неразрывности, импульса и энергии для сплошной среды получить их аппроксимацию:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{k=1}^N m_k (\vec{U}_i - \vec{U}_k) \nabla_i W_{ik}; \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{U}_i}{dt} = - \sum_{k=1}^N m_k \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_k}{\rho_k^2} + q_{ik} \right) \nabla_i W_{ik}; \quad (3)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N m_k \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_k}{\rho_k^2} + q_{ij} \right) (\vec{U}_i - \vec{U}_k) \nabla_i W_{ik}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho_i$ ,  $P_i$ ,  $E_i$  — плотность, давление и внутренняя энергия частицы с номером  $i$ .

Градиент от интерполяционного ядра запишется как

$$\nabla_i W_{ik} = W' \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_k}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|}.$$

Искусственная вязкость задается следующим образом:

$$q_{ik} = \frac{2}{\rho_i + \rho_k} \left( -\alpha \mu_{ik} \frac{c_i + c_k}{2} + \beta \mu_{ik}^2 \right),$$

$$\mu_{ik} = \begin{cases} h \left( \vec{U}_i - \vec{U}_k \right) \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_k}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|^2 + \eta^2}, & \left( \vec{U}_i - \vec{U}_k \right) \left( \vec{r}_i - \vec{r}_k \right) < 0; \\ 0, & \left( \vec{U}_i - \vec{U}_k \right) \left( \vec{r}_i - \vec{r}_k \right) \geq 0, \end{cases}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты линейной и квадратичной вязкости, подбираемые эмпирическим путем для заданного класса задач;  $c_i$  — значение скорости звука частицы с номером  $i$ ;  $\eta^2 = \varepsilon h_{ij}^2$ ,  $\varepsilon = 0,01$ .

Указанные выше уравнения будем решать по схеме *предиктор-корректор*.

При расчете детонации уравнение (4) заменяется на следующее:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N m_k \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_k}{\rho_k^2} + q_{ij} \right) \left( \vec{U}_i - \vec{U}_k \right) \nabla_i W_{ik} - Q_i K(\widetilde{W}_i, P_i, \rho_i),$$

где  $\widetilde{W}_i$  — массовая концентрация ВВ — невозрастающая функция от  $t$ , которая характеризует степень химического превращения ВВ в продукт взрыва (ПВ): значение  $\widetilde{W}_i$  лежит в диапазоне от  $\widetilde{W}_i = 1$  для ВВ до  $\widetilde{W}_i = 0$  для ПВ;  $Q_i$  — калорийность ВВ;  $K(\widetilde{W}_i, P_i, \rho_i) = \frac{d\widetilde{W}_i}{dt}$  — скорость выгорания ВВ. Для реагирующего ВВ задается уравнение состояния, которое является функцией трех независимых переменных, а именно: к обычным переменным — плотности  $\rho_i$  и энергии  $E_i$  — добавляется концентрация ВВ  $\widetilde{W}_i$ :  $P_i = f(\rho_i, E_i, \widetilde{W}_i)$ .

Для замыкания системы уравнений (2)–(4) необходимо указать алгоритм однозначного задания величины  $\widetilde{W}_i$ , определяемый уравнением кинетики детонации.

При расчете детонации с контролем скорости детонационной волны для каждой частицы по ее координатам геометрическим способом [6] в начальный момент времени определяется момент взрывчатого превращения ВВ в ПВ. При достижении этого времени зануляется концентрация ВВ и мгновенно выделяется энергия, равная калорийности ВВ.

### Тестовые расчеты

В тестовых расчетах величины измеряются в следующих единицах: время — в мкс, расстояние — в см, плотность — в г/см<sup>3</sup>, скорость — в км/с, давление — в ГПа, энергия и калорийность — в кДж/г.

**Задача 1. О распространении плоской стационарной детонационной волны.** Тестирование в реализованном методе SPH модели расчета детонации с контролем скорости проводилось на задаче о распространении плоской стационарной детонационной волны по образцу ВВ длиной 6 см начальной плотностью 1,9. Инициирование ВВ производилось на левой границе образца. Данный расчет выполнялся по методикам SPH и Д [7]. Значения термодинамических величин в точке Жуге для исследуемого ВВ: массовая скорость 1,9; скорость нормальной детонации 7,53; давление 27,1832; плотность 2,541208.

Все расчеты проводились с использованием кинетики мгновенного энерговыделения. Расчеты по методу SPH выполнялись с коэффициентами линейной и квадратичной вязкости  $\alpha = 1$  и  $\beta = 1$ . В базовом расчете количество частиц в направлении оси абсцисс составило  $n = 3000$ . Расчеты по методике Д проводились на сетке с размером ячейки 0,01 в направлении движения волны (600 ячеек). На рис. 1 показаны профили давления на моменты времени  $t = 1,5$  и  $t = 3$ .

Далее по методу SPH были проведены расчеты на сходимость. Количество частиц в направлении оси абсцисс в этих расчетах составило  $n = 300; 1500; 3000$ . Полученные результаты в сравнении с результатами по методике Д показаны на рис. 2 (см. также цветную вкладку).

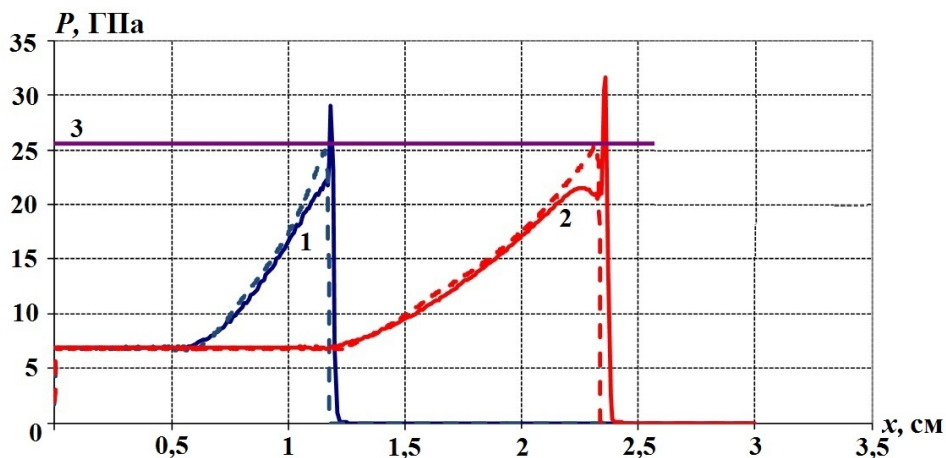


Рис. 1. Задача 1. Расчетные профили давления: 1 –  $t = 1,5$ ; 2 –  $t = 3$ ; 3 – давление Жуге; — — — по методу SPH; — — — по методике Д

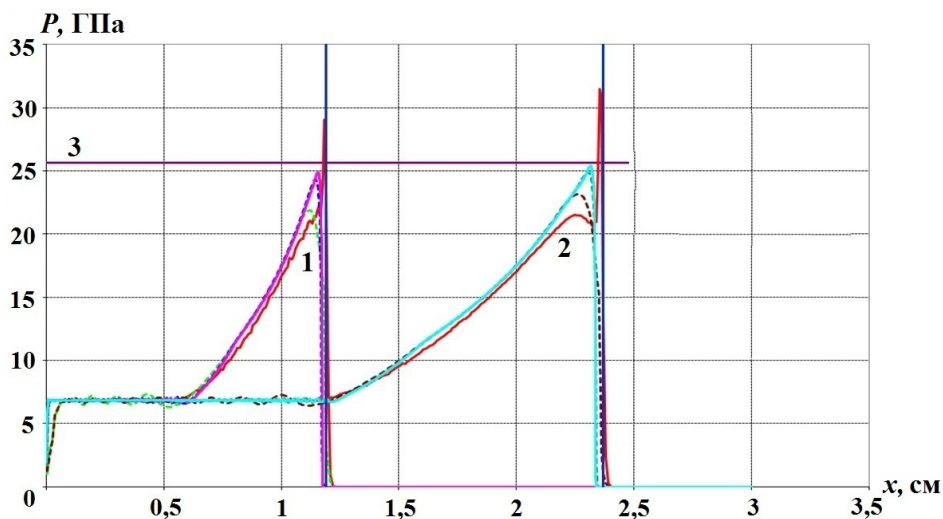


Рис. 2. Задача 1. Профили давления, рассчитанные по методу SPH с различным числом частиц, в сравнении с профилями, полученными по методике Д: 1 –  $t = 1,5$ ; 2 –  $t = 3$ ; 3 – давление Жуге; — — — методика Д; — — —, — — — — SPH,  $n = 300$ ; — — —, — — — — SPH,  $n = 1500$ ; — — —, — — — — SPH,  $n = 3000$ ; — — — — аналитическое положение фронта УВ

Графики на рис. 2 демонстрируют сходимость результатов при увеличении количества частиц. Также видно, что метод SPH позволяет с приемлемой точностью моделировать распространение плоской стационарной детонационной волны, правда, для этого требуется большее число расчетных элементов, чем в методике Д.

**Задача 2. Зависимость глубины возбуждения детонации от нагружающего давления для ВВ на основе ТАТБ.** Рассмотрим расчет одномерной задачи определения глубины преддетонационного участка в исследуемом ВВ при заданных значениях давления на границе ВВ в плоской инициирующей ударной волне прямоугольного профиля.

Определение зависимости глубины возбуждения детонации от нагружающего давления, называемой диаграммой Пополато [8], представляет собой серию расчетов одномерной задачи, в которой инициирование ВВ на основе ТАТБ (триаминотринитробезола) осуществлялось нагружением ударной волной через экраны из алюминия. Начальные данные в алюминиевом экране получены в предположении, что для алюминия использовался УРС в форме Ми–Грюнайзена с параметрами  $\rho_0 = 2,71$ ;  $c_0 = 5,52 \text{ м/с}^2$ ;  $n = 3,54$ ;  $h = 2,7$ , а скорость ударной волны в алюминии задавалась

соотношением  $D = 5,333 + 1,356U$ . Тогда при заданном значении  $U$  состояние экрана определяется формулами

$$E = \frac{U^2}{2}; \quad \rho = \rho_0 \frac{D}{D - U}; \quad P = \rho_0 D U.$$

Начальная геометрия системы изображена на рис. 3, где  $AB$  и  $CD$  — свободные поверхности ( $P_{гр} = 0$ ),  $AD$  и  $BC$  — жесткие стенки. Количество частиц в направлении оси абсцисс составило  $n = 3000$ .

На рис. 4 показана кривая Пополато для ВВ ТАТБ с начальной плотностью 1,91, полученная в расчете по методу SPH. На этот же график нанесены экспериментально полученные точки. Из представленного рисунка видно согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

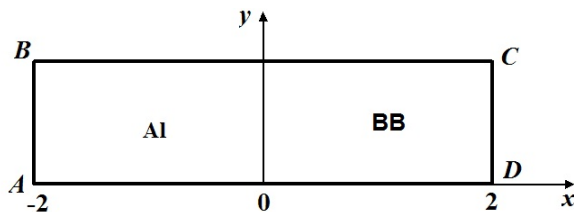


Рис. 3. Начальная геометрия задачи 2

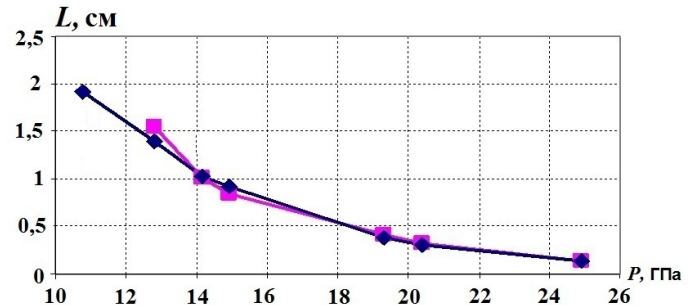


Рис. 4. Задача 2. Диаграммы Пополато для ВВ ТАТБ с начальной плотностью 1,91: —◆— расчет по методу SPH; —■— эксперимент [8]

**Задача 3. Возбуждение детонации в ВВ на основе ТАТБ расходящейся цилиндрической волной.** На рис. 5 изображена начальная геометрия плоской двумерной модельной задачи, демонстрирующей возбуждение детонации в ВВ на основе ТАТБ расходящейся ударной волной [9].

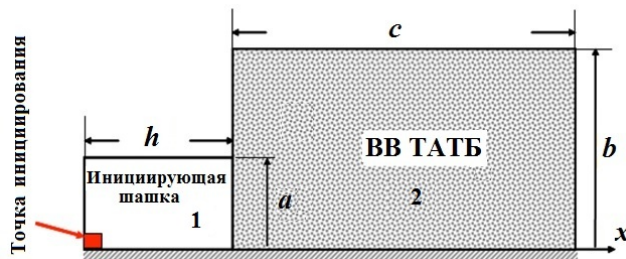


Рис. 5. Начальная геометрия задачи 3

Поверхность на оси  $X$  — ось симметрии системы. Начальные условия нулевые: во всех областях  $U_x = U_y = 0$ ;  $E = P = 0$ . В начальный момент времени шашка из активного ВВ (область 1 на рис. 5) инициируется в точке на оси  $OX$ . Детонация в инициирующей шашке, состоящей из ВВ на основе октогена с начальной плотностью 1,86, рассчитывается с контролем скорости детонации, в ВВ ТАТБ — с кинетикой МК. Размеры шашки и исследуемого образца:  $a = 0,75$ ;  $b = 2,5$ ;  $c = 3$ ;  $h = 1$ .

По методу SPH проведено два расчета с разным числом частиц. В расчете 1 частицы расставлялись равномерно с шагом  $\Delta x = \Delta y = 0,01$ , сглаживающая длина при этом составила  $h = 0,0133$ , суммарное число частиц  $\sim 189\,000$ . В расчете 2 шаг по пространству составил  $\Delta x = \Delta y = 0,005$ , сглаживающая длина  $h = 0,00655$ , суммарное число частиц  $\sim 756\,000$ . Коэффициенты линейной и квадратичной вязкости в этих расчетах были равны 1 и 8 соответственно. Полученные результаты сравнивались с результатом расчета по методике Д, выполненного на квадратной счетной сетке с шагом по пространству 0,025 (общее число ячеек в задаче  $\sim 26\,000$ ), и с положением фронта детонационной волны из эксперимента.

На рис. 6 (см. также цветную вкладку) показано распределение концентрации ВВ, полученное на несколько моментов времени по методу SPH в расчетах 1 и 2, а также по методике Д. Представленные данные демонстрируют совпадение результатов расчетов по двум методикам по положению фронта детонационной волны. На рис. 7 (см. также цветную вкладку) показано распределение концентрации ВВ, полученное в расчете 2 и по методике Д на момент  $t = 4,5$ , с указанием

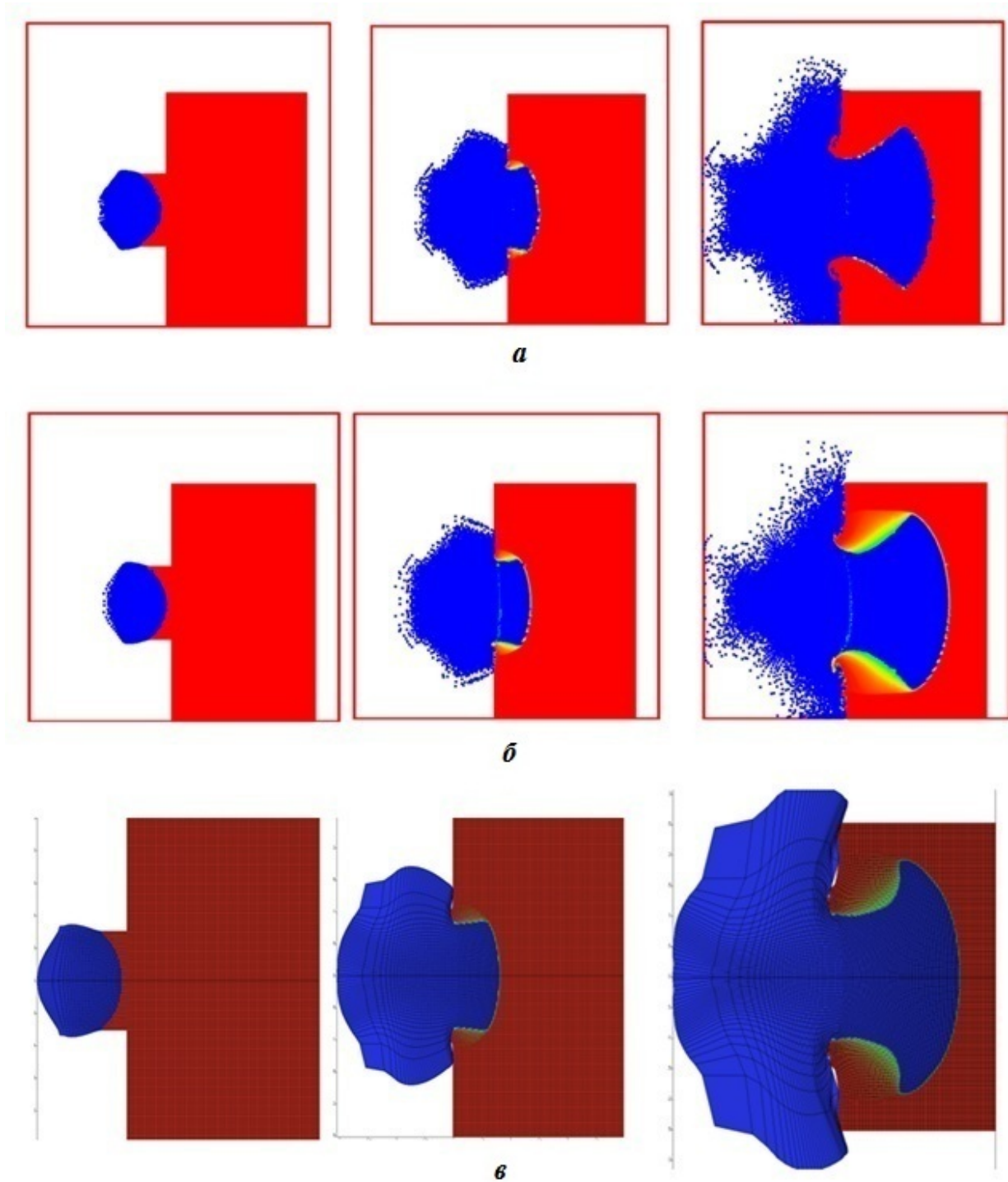


Рис. 6. Задача 3. Поле концентрации ВВ на разные моменты времени: *a* — расчет 1; *б* — расчет 2; *в* — расчет по методике Д

положения фронта ударной и детонационной волн. Различие картин выгорания, полученных по методикам SPH и Д, наблюдается лишь в форме невыгоревших зон.

Как следует из рис. 7, положения фронта волны, полученные в расчетах по методу SPH и методике Д, совпадают. Результаты расчета 2 ближе к результатам по методике Д по сравнению с расчетом 1 (см. рис. 6, 7). Поэтому можно сделать вывод, что для проведения подобных расчетов по методу SPH достаточно расстановки частиц с шагом 0,01. Именно такая равномерная расстановка частиц с  $\Delta x = 0,01$ ,  $\Delta y = 0,01$  применялась во всех рассматриваемых ниже расчетах по методу SPH.

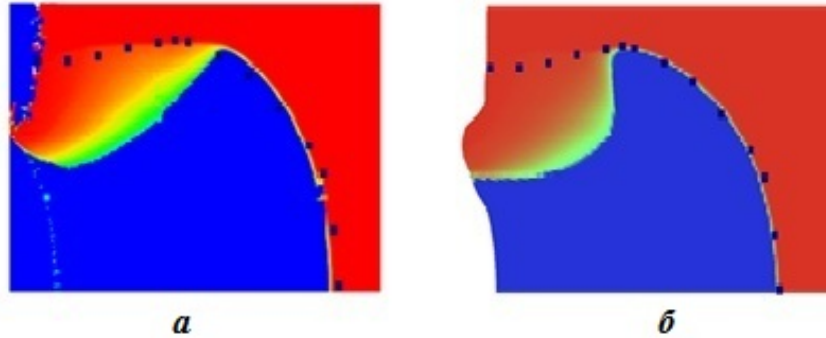


Рис. 7. Задача 3. Поле концентрации ВВ с положением фронта волны: *a* — расчет 2; *b* — расчет по методике Д

**Задача 4. Влияние толщины инициирующей пластины из ВВ на основе ТЭНа на формирование детонации в ВВ на основе октогена.** Начальная геометрия тестовой задачи изображена на рис. 8. Исследование применимости модели кинетики МК к моделированию формирования и распространения детонации в ВВ на аналогичных тестах приведено в работе [10].

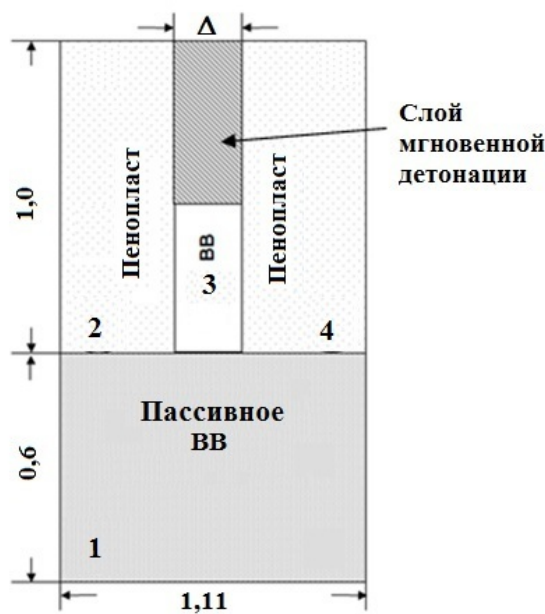


Рис. 8. Начальная геометрия задачи 4

При подготовке к счету эта система разбивалась на четыре математические области (см. рис. 8). В качестве "пассивного" ВВ (область 1) задавалось ВВ1 на основе октогена с плотностью 1,86. Плотность пенопласта 0,6, а плотность ВВ на основе ТЭНа (тетранитропентаэритрита) 1,525. Толщина инициирующей пластины  $\Delta$  варьировалась. Распространение детонации в активном ВВ (область 3) рассчитывалось с контролем скорости детонационной волны, в пассивном ВВ — по модели кинетики детонации МК [5]. В начальный момент времени  $t = 0$  в активном ВВ инициировался слой мгновенной детонации.

В расчете по методу SPH оба коэффициента — линейной и квадратичной вязкости — были равны 1,0; сглаживающая длина  $h = 0,0133$ . Толщина инициирующей пластины бралась равной  $\Delta = 0,1$  и  $0,2$ .

На рис. 9 показано поле концентраций ВВ в расчете по методу SPH с разной толщиной инициирующей пластины на контрольные моменты времени. Из рисунка видно, что при толщине инициирующей пластины  $\Delta = 0,1$  детонация в пассивном ВВ затухает. Аналогичный результат получен

в расчете, выполненном по методике Д. При толщине инициирующей пластины  $\Delta = 0,2$  продолжается распространение детонационной волны в пассивном ВВ. То же самое получается и в аналогичном расчете, выполненном по методике Д. На рис. 10 показано поле концентраций ВВ в расчете по методу SPH и по методике Д.

Таким образом, наблюдается совпадение результатов расчетов по методу SPH и методике Д.

**Задача 5. Влияние толщины инициирующей пластины из ВВ на основе ТЭНа на формирование детонации в ВВ на основе октогена и ТАТБ.** На рис. 11 изображена начальная геометрия задачи в плоской постановке [10].

Начальные условия нулевые: во всех областях  $U_x = U_y = 0$ ;  $E = P = 0$ . В начальный момент времени пластина из ВВ на основе ТЭНа (ВВ1) в области 1 инициируется по поверхности. Плотность ВВ1 равна 1,525, ВВ на основе октогена и ТАТБ (ВВ2) — 1,89.

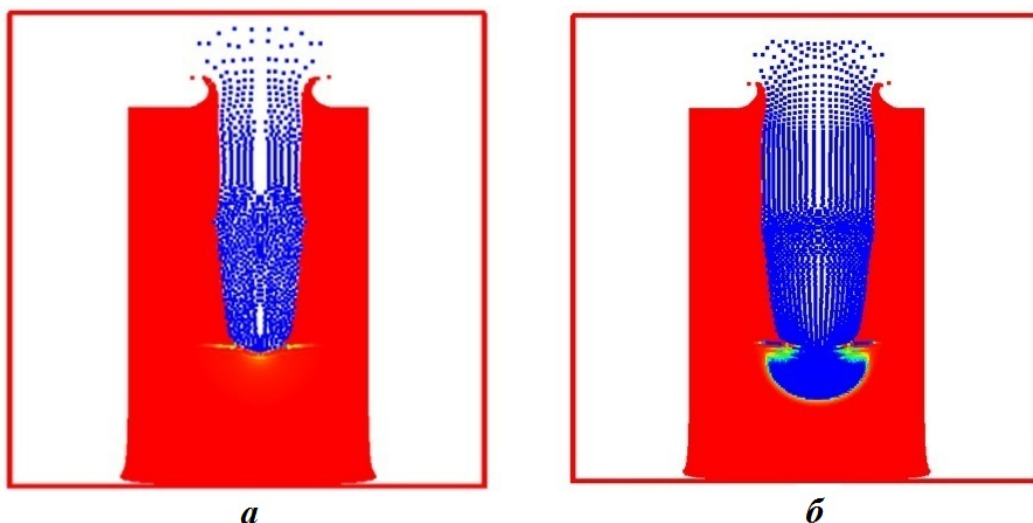


Рис. 9. Задача 4. Поле концентраций ВВ в расчете по методу SPH: *a* —  $\Delta = 0,1, t = 1,2$ ; *б* —  $\Delta = 0,2, t = 1,0$



Рис. 10. Задача 4. Поле концентраций ВВ,  $\Delta = 0,2, t = 1,0$ : *a* — расчет по методу SPH; *б* — расчет по методике Д

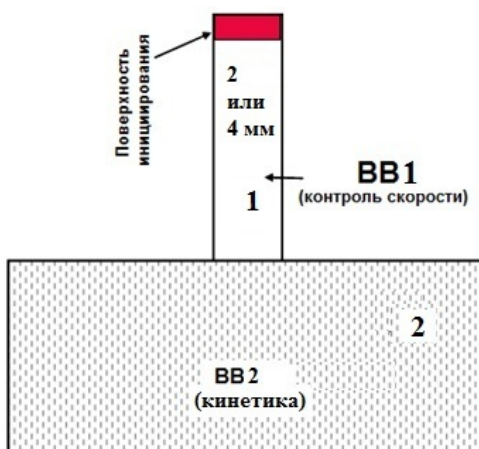


Рис. 11. Начальная геометрия задачи 5

Требуется определить, возникнет ли стационарная детонация в образце ВВ2 при толщине пластины 0,2 и 0,4. Детонация в инициирующей пластине считается с контролем скорости детонации, в ВВ2 — с кинетикой МК [5]. Коэффициенты линейной и квадратичной вязкости равны 1; сглаживающая длина  $h = 0,0133$ .

На рис. 12 показаны поля концентраций ВВ2 для толщины инициирующей пластины из ВВ1  $\Delta = 0,2$ . При такой толщине инициирующей пластины детонация в ВВ2 угасает. На рис. 13 — поля концентраций ВВ2 для толщины инициирующей пластины  $\Delta = 0,4$ .

Из рисунков видно, что при толщине инициирующей пластины  $\Delta = 0,2$  при прохождении ударной волны на глубину до 0,1 стационарной детонации не возникает. При толщине инициирующей пластины  $\Delta = 0,4$  стационарная детонация возникает практически сразу и характеризуется типичной детонационной картиной. Результаты расчетов согласуются между собой.



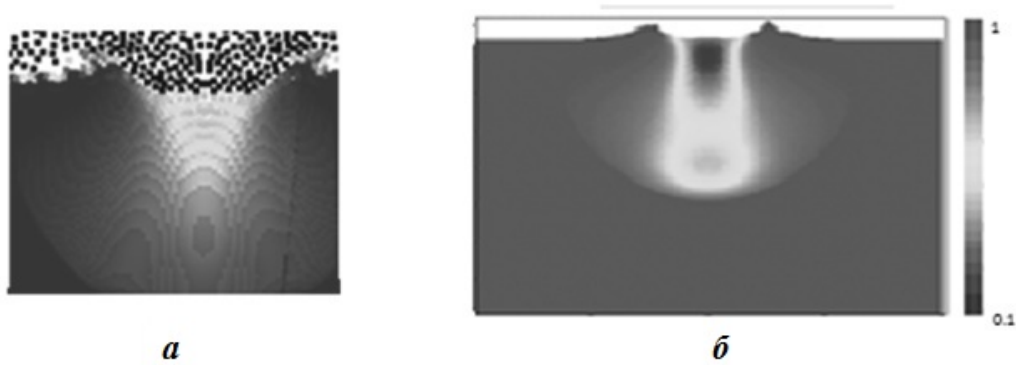


Рис. 12. Задача 5. Поле концентраций ВВ в расчетах при  $\Delta = 0,2$ : а — по методу SPH; б — по методике Д

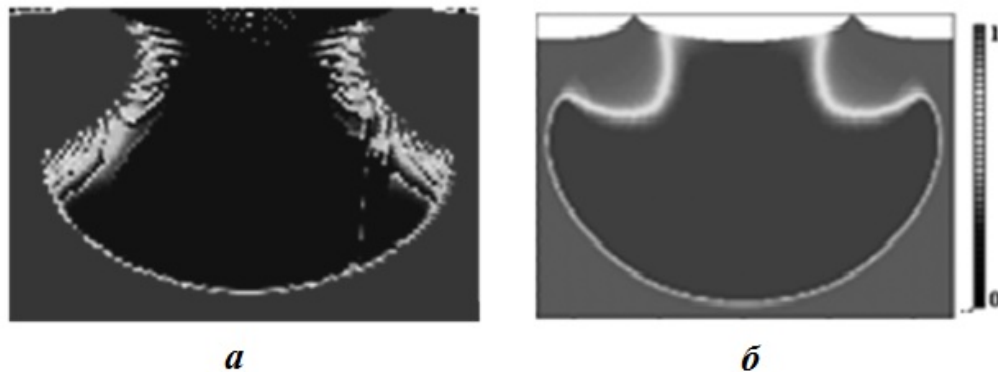


Рис. 13. Задача 5. Поле концентраций ВВ в расчетах при  $\Delta = 0,4$ : а — по методу SPH; б — по методике Д

**Задача 6. Возбуждение детонации в ВВ на основе октогена расходящейся цилиндрической волной через демпфер из оргстекла.** Данный расчет был проведен для сравнения с результатами опытов, полученными методом протонной радиографии [11]. Требуется рассчитать формирование детонации под воздействием расходящейся ударной волны.



Рис. 14. Начальная геометрия задачи 6

Начальная геометрия изображена на рис. 14. Плотность ВВ1 на основе ТЭНа 1,525, плотность пенопласта 0,65, оргстекла 1,18, ВВ на основе октогена 1,883. Коэффициенты линейной и квадратичной вязкости в расчете по методу SPH были равны 1 и 8 соответственно; сглаживающая длина  $h = 0,0133$ .

Начальные условия нулевые: во всех областях  $U_x = U_y = 0$ ,  $E = P = 0$ . Распространение детонации в ВВ1 рассчитывалось с контролем скорости детонационной волны.

На рис. 15 показаны протонограммы эксперимента и распределения плотности, полученные в расчетах методом SPH и по методике Д на два момента времени. Из представленных результатов видно, что метод SPH позволяет моделировать формирование детонации в пассивном ВВ. Расчетная и экспериментальная картины близки между собой.

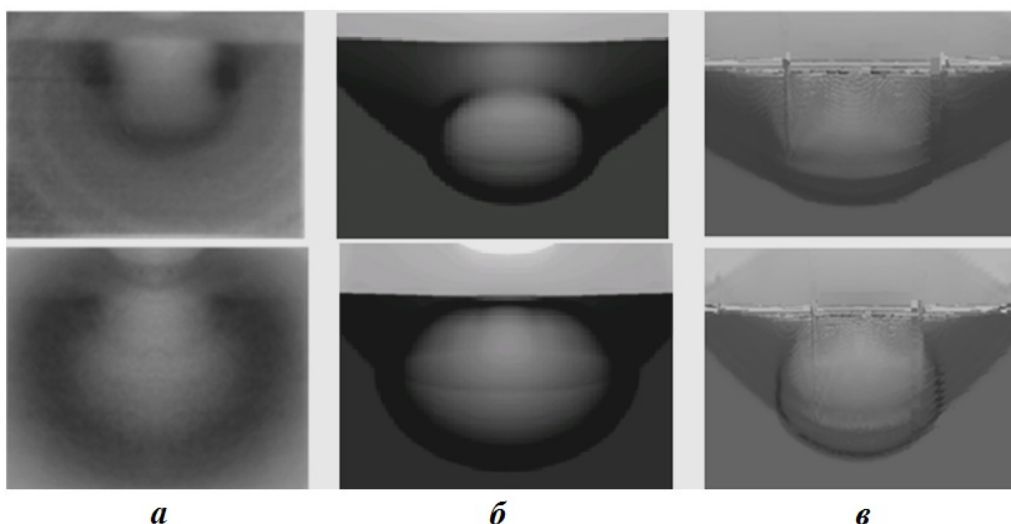


Рис. 15. Задача 6. Распределение плотности на два момента времени: *a* — эксперимент; *б* — расчет по методике Д; *в* — расчет по методу SPH

### Заключение

Проведенные численные исследования показали, что метод SPH можно применять для моделирования процесса детонации ВВ как с контролем скорости детонационной волны, так и с кинетикой по модели МК.

По результатам исследований выработаны рекомендации по подбору количества частиц для проведения расчетов по методу SPH с кинетикой детонации МК. Кроме того, на решение сильно влияет выбор входящих коэффициентов (сглаживающая длина  $h$ , коэффициенты вязкости  $\alpha$  и  $\beta$ ). В данной работе приведены оптимальные значения этих параметров. К сожалению, набор оптимальных коэффициентов часто индивидуален для каждой задачи и подбор их занимает довольно много времени.

Полученные в тестах результаты согласуются с результатами расчетов по методике Д и имеющимися экспериментальными данными.

### Список литературы

1. Cloutman L. D. An evaluation of smoothed particle hydrodynamics // Advances in the Free-Lagrange method. Lecture Notes on Physics. 1990. Vol. 395. P. 248–266.
2. Libersky L. D., Petschek A. G. Smoothed particle hydrodynamics with strength of materials // Ibid. P. 267–295.
3. Libersky L. D., Petschek A. G., Carney T. C., Hipp J. P., Allahbadi F. A. High-strain Lagrangian hydrodynamics. A three-dimensional SPH code for dynamic material response // J. Comp. Phys. 1993. Vol. 109. P. 67–75.
4. Libersky L. D., Petschek A. G. Cylindrical Smoothed Particle Hydrodynamics // Ibid. P. 76–83.
5. 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. С. 32–39.
6. Бондаренко Ю. А. Свойства решений при счете нормальной детонации навязыванием энерговыделения с заданной скоростью фронта // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов 2009. Вып. 1. С. 3–18.

7. Артемьев А. Ю., Башурова М. С., Делов В. И., Дмитриева Л. В., Самигулина Р. З., Сенилова О. В., Чернышев Ю. Д. Пакет прикладных программ Д для решения нестационарных задач газодинамики в переменных Лагранжа и задач механики деформируемого твердого тела на регулярных сетках // III Забабахинские науч. чтения. Тез. докл. Кыштым, 1992. С. 41–42.
8. Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н., Михайлов А. Л., Комиссаров В. В., Седов А. А. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ // Сб. докл. межд. конф. "IX Харитоновские тематические науч. чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 69–73.
9. Базрах С. М., Володина Н. А., Зайцева М. О., Карпенко Н. И., Ковтун А. Д., Комрачков В. А., Макаров Ю. М., Морозов В. Г., Рябчун Л. А. Экспериментальное и численное исследование развитие процесса детонации ВВ типа ТАТБ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 1. С. 41–56.
10. Комрачков В. А., Карпенко Н. И., Ковтун А. Д., Корепова Н. В., Макаров Ю. М., Морозов В. Г. Рентгенографические исследования влияния нагрева на ударно-волновую чувствительность пластифицированного ТАТБ // Тр. межд. конф. "V Харитоновские тематические науч. чтения". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 208–214.
11. Трутнев Ю. А., Михайлов А. Л., Сырунин М. А., Ткаченко И. А., Огородников В. А., Цой В. П., Лебедев А. И., Панов К. Н., Ткаченко Б. И., Аринин В. А., Орешков О. В., Таценко М. В., Карманов С. А., Храмов И. В., Куропаткин Ю. П., Михайлюков К. Л., Максимов А. В., Матюшин А. А., Михеев М. С., Тюрин Н. Е., Федотов Ю. С., Людомирский Э. А., Зятыков О. В. Протонная радиография быстропротекающих процессов на базе ускорителя У-70. Новые возможности // Сб. докл. межд. конф. "XIX Харитоновские чтения". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017.

Статья поступила в редакцию 23.11.17.

STUDYING THE SPH METHOD APPLICABILITY TO THE 2D SIMULATION OF GAS DYNAMIC PROCESSES WITH DETONATION / I. M. Epishkov, I. V. Zalyalova, D. M. Linnik, S. Yu. Suslova (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, N. Novgorod region).

The paper describes the study into the feasibility of using the classic SPH method for the 2D simulation of gas dynamic processes with detonation. The main formulas of the method are presented, as well as results of gas dynamics simulations with the detonation wave rate control and using the Morozov-Karpenko kinetic model. The calculated results are compared with the available experimental data and also with similar results obtained using the two-dimensional D code.

*Keywords:* gas dynamics, the Morozov-Karpenko model of detonation kinetics, detonation wave, the SPH method, interpolation core, smoothing length.

---