

УДК 531.58

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО МЕТОДИКЕ SPH  
ПАКЕТА ПРОГРАММ "ЛОГОС"  
ЗАДАЧ СОУДАРЕНИЙ СТАЛЬНЫХ УДАРНИКОВ  
С АЛЮМИНИЕВЫМИ МИШЕНЯМИ СО СКОРОСТЬЮ 6,2 КМ/С**

И. В. Коваленко, Н. А. Жаворонкова, Е. И. Липенкова, Ю. Н. Бухарев  
(СарФТИ, г. Саров Нижегородской области; НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Представлены материалы по постановке нескольких задач высокоскоростного удара и результатам их численного 3D-моделирования по методике SPH пакета программ ЛОГОС, разрабатываемого в ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" (г. Саров Нижегородской области). Целью работы являлось получение верификационных данных для условий взаимодействия ударников (сферы, диска) из стали ЭП-637 с мишенью (диском) из алюминиевого сплава АМг-6 со скоростью 6,2 км/с посредством сравнения результатов проведенных расчетов с опубликованными экспериментальными данными и расчетами по другим методикам.

*Ключевые слова:* численное моделирование, высокоскоростной удар, методика SPH, пакет программ ЛОГОС, ударник, мишень.

### Введение

Численное моделирование процессов высокоскоростных (до 5–10 км/с и более) воздействий ударников на элементы конструкций является весьма актуальным для определения безопасных условий эксплуатации различных технических устройств, например космических аппаратов. В ряде зарубежных и отечественных публикаций показана эффективность метода SPH (Smooth Particle Hydrodynamics — гидродинамика сглаженных частиц) для решения соответствующих прикладных задач с большими деформациями, разрушением и фрагментацией материалов с учетом их упругопластических свойств. Как известно, метод SPH является бессеточным лагранжевым методом численного моделирования процессов интенсивного деформирования сплошной среды, представляемой в виде множества частиц, сглаженных в пространстве посредством задаваемой функции распределения их параметров (функции ядра).

В настоящее время в модуле решения задач динамической прочности пакета программ (ПП) ЛОГОС реализована технология проведения 3D-расчетов деформирования конструкций, представленных областями из SPH-частиц и ко-

нечных элементов с возможностью расчета контактного взаимодействия между ними [1].

### Постановка задач.

#### Математические модели и их параметры

Рассматривались две задачи, геометрические схемы которых с указанием размеров приведены на рис. 1. В обеих задачах в качестве материала ударников взята высокопрочная сталь ЭП-637, в качестве материала неподвижного диска — алюминиевый сплав АМг-6. Начальная скорость ударника  $V_0$  в обоих случаях составила 6,21 км/с, масса сферического ударника — 10 г (как в опыте, описанном в [2]).

В задаче 1 со сферическим ударником исследовались динамика развития отверстия в диске, параметры запреградного осколочного потока в зависимости от ряда факторов: числа счетных частиц, типа закрепления боковой поверхности диска, параметра  $a$  уравнения состояния (УРСа), значения сглаживающей длины  $h$ . В задаче 2 соударения дисков анализировались расчетные зависимости давления  $P$  и массовой скорости  $u$  в центральной зоне дисков от времени  $t$  на на-

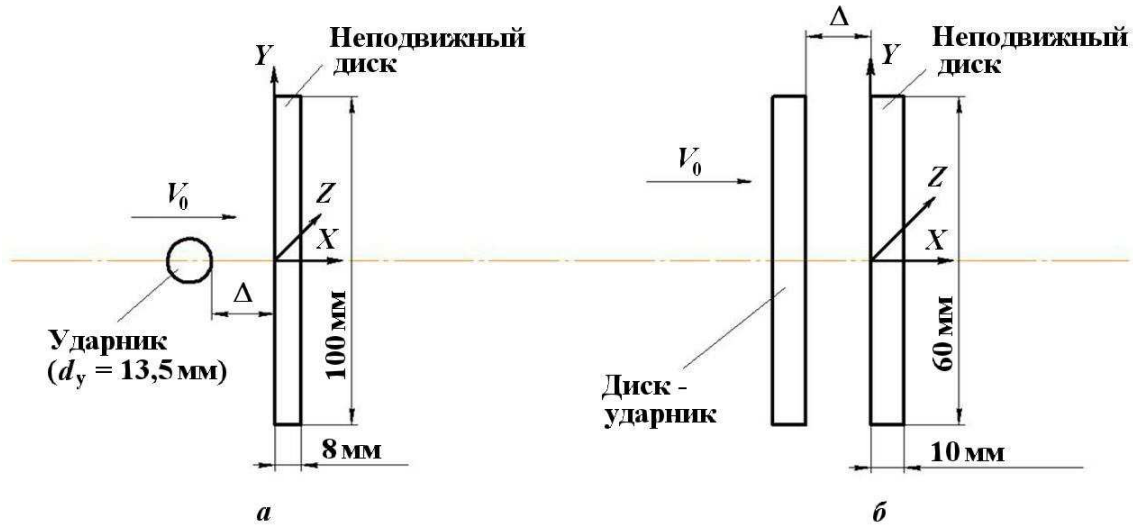


Рис. 1. Геометрия задач (зазор  $\Delta = 5$  мм): *a* — удар сферического ударника по диску; *b* — соударение двух дисков

чальной (ударно-волновой) стадии взаимодействия.

При задании размеров и числа частиц в областях задач учитывалась общепринятая для методики SPH рекомендация о желательности равенства масс частиц, выполненных из различных материалов. Это условие определило соотношение между диаметрами частиц ( $d_{\text{ч}}$ ) из стали ( $d_{\text{чст}}$ ) и алюминия ( $d_{\text{чал}}$ ):  $d_{\text{чст}} \approx 0,7d_{\text{чал}}$ . В основных вариантах задачи 1 принималось  $d_{\text{чал}} = 1$  мм и  $d_{\text{чст}} = 0,67$  мм, в задаче 2  $d_{\text{чал}} = 1$  мм и  $d_{\text{чст}} = 0,5$  мм. Параметр  $h$  интерполяционного ядра (сглаживающая длина) в большинстве вариантов брался равным  $h = 1,2d_{\text{ч}}$ , в одном варианте  $h = 1,4d_{\text{ч}}$ .

В качестве УРСов материалов принималась реализованная в ПП ЛОГОС форма УРСа Грюнайзена с опорой на ударную адиабату [3]:

– на адиабате сжатия

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) \rho_0 e; \quad (1)$$

– на адиабате расширения

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) \rho_0 e, \quad (2)$$

где  $P$  — давление;  $\rho_0, \rho$  — начальная и текущая плотность материала;  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ;  $C, S_1, S_2, S_3$  — константы ударной адиабаты, соответствующие аналитическому выражению зависи-

мости скорости ударной волны (УВ) от массовой скорости;  $e$  — удельная внутренняя энергия;  $\gamma_0$  — начальное значение коэффициента Грюнайзена;  $a$  — безразмерный параметр, соответствующий поправке первого порядка в зависимости коэффициента Грюнайзена  $\gamma$  от удельного объема  $v = 1/\rho$ .

Для расчета напряженно-деформированного состояния материалы рассматривались как изотропные упругопластические с модулем сдвига  $G$  и модулем объемной упругости  $K = \rho_0 C^2$ . При этом совместно с УРСом (1), (2) использовались условие текучести Мизеса и модель деформационного упрочнения материала в виде

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + E_h \varepsilon_p, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести;  $\sigma_{s0}$  — начальное значение предела текучести;  $E_h$  — модуль пластического упрочнения;  $\varepsilon_p$  — эффективная пластическая деформация.

Предельное отрицательное давление ограничивалось откольным значением  $P = P_{\text{отк}}$ , а эрозийное разрушение не учитывалось. В качестве критерия разрушения (разрыва) принималось условие методики SPH:  $l \geq 2h$ , где  $l$  — расстояние между центрами частиц.

Параметры УРСов и моделей материалов (табл. 1) бралась на основе данных из нескольких источников [4–6]. Значения  $S_2, S_3$  полагались равными нулю.

В табл. 2 приводятся данные для пяти вариантов задачи 1, соответствующих вариациям ряда параметров; здесь и далее  $h_{\text{отн}} = h/d_{\text{ч}}$ .

Таблица 1

**Параметры УРСов и моделей материалов**

Материал	$\rho_0, \text{кг/м}^3$	$C, \text{м/с}$	$S_1$	$\gamma_0$	$G, \text{ГПа}$	$E_h, \text{ГПа}$	$\sigma_{s0}, \text{ГПа}$	$P_{\text{отк}}, \text{ГПа}$
АМГ-6	2 640	5 350	1,35	2,0	27,5	0,6	0,17	-1,2
ЭП-637	8 010	4 650	1,40	1,8	81,1	2,2	1,0	-6,2

Таблица 2

**Расчетные варианты задачи 1**

Параметр	Номер варианта				
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
$a$	0,5	0,5	0,5	0	0,5
$h_{\text{отн}}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4
Число частиц в задаче	67 104	67 104	226 632	67 104	67 104
Закрепление диска	Есть	Нет	Нет	Есть	Нет

В задаче 2  $a = 0,5$ ;  $h_{\text{отн}} = 1,2$ ; число частиц составило 226 080 в варианте 2-1 и 846 896 в варианте 2-2.

Параметры искусственной вязкости в расчетах принимались такими же, как в [1].

Расчеты процессов проводились до  $t = 45$  мкс в задаче 1 и до  $t = 5$  мкс в задаче 2.

Задачи рассчитывались на персональных компьютерах как в однопроцессорном, так и параллельном (4-8 процессоров) режиме.

**Основные результаты численного моделирования**

Сначала рассмотрим результаты расчетов задачи 1.

Для сопоставления вариантов 1-1 (с закреплением боковой поверхности диска) и 1-2 (без закрепления) на рис. 2 показан график полных перемещений  $W(t)$  элементов боковой поверхности диска в варианте без закрепления. Перемещение  $W$  не превышает 0,14 мм за все время процесса, что значительно меньше размеров диска, ударника, запреградного осколочного потока. Эти данные, а также прямое сопоставление ряда параметров (см. ниже) свидетельствуют о том, что в задаче 1 наличие или отсутствие закрепления боковой поверхности диска практически не влияет на характерные параметры процесса, и прежде всего на динамику развития запреградного осколочного потока.

Сопоставление расчетных данных по форме и размерам запреградного потока (варианты 1-2 и 1-3) с опытной рентгенограммой при  $t_1 =$

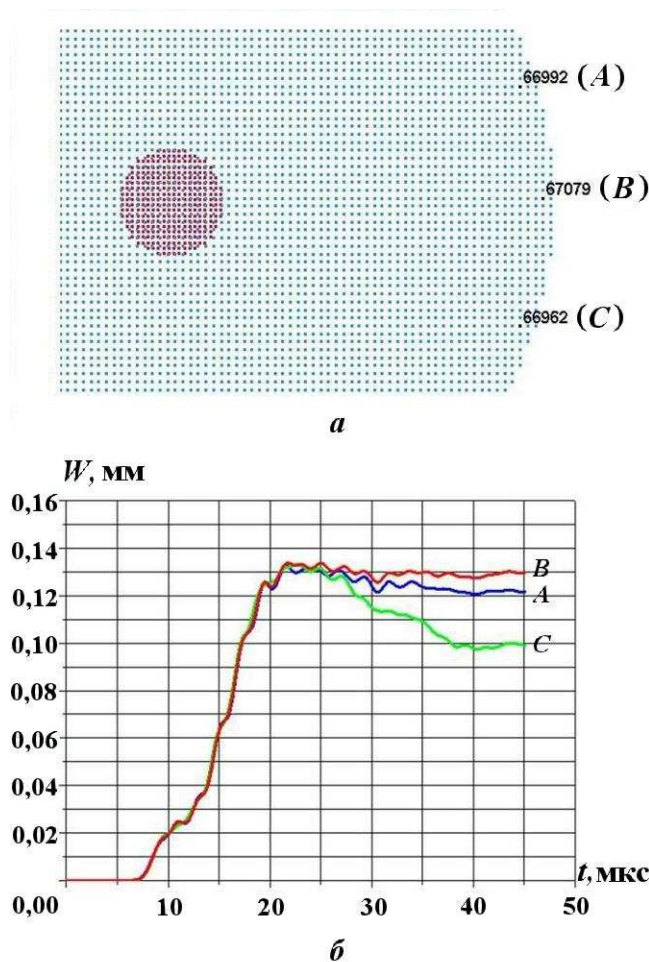


Рис. 2. Вариант 1-2. Расположение элементов диска в зоне боковой поверхности (а) и их результирующие перемещения (б)

= 24 мкс из работы [2] (здесь и далее время  $t_1$  отсчитывается от момента начала удара шарика по диску, а время  $t$  — от момента начала расчета:  $t = t_1 + 0,8$  мкс) приводится на рис. 3 (см. также цветную вкладку). Видна близость формы и размеров запреградного осколочного потока в опыте и расчетах. Количественные данные также близки. Продольные размеры области запреградного потока в опыте  $X_{лч} = 127$  мм практически совпадают с расчетными размерами области расположения стальных лидирующих частиц  $X_{стлч} = 122 \div 126$  мм. Для лидирующих алюминиевых частиц расчетные значения  $X_{аллч} = 144 \div 147$  мм, т. е. превышают опытное значение на 11%. Вероятно, в полюсной зоне рентгенограммы зафиксированы преимущественно стальные частицы (более плотные по сравнению с алюминиевыми).

На рис. 4 приведены временные зависимости диаметра отверстия  $D_{отв}$  в диске из АМг-6 для трех расчетов: вариантов 1–2, 1–3 данной ра-

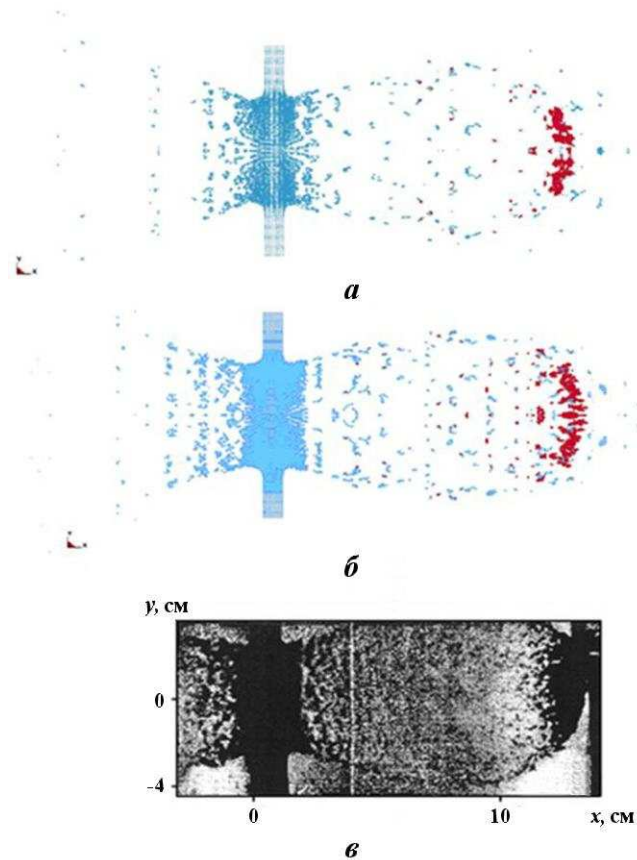


Рис. 3. Запреградный осколочный поток,  $t_1 = 24$  мкс: а — расчет, вариант 1–2; б — расчет, вариант 1–3; в — опытная рентгенограмма [2]

боты и расчета из [2]. Среднее расчетное значение  $D_{отв}$  при  $t = 45$  мкс близко к измеренному после опыта значению  $D_{отв} = 48$  мм. Из характера кривых  $D_{отв}(t)$  следует, что ко времени  $t \approx 45$  мкс расширение отверстия почти завершается. В расчете из [2] получены несколько меньшие значения  $D_{отв}(t)$  по сравнению с вариантами 1–2 и 1–3.

На рис. 5 приведены кривые возрастания во времени максимального диаметра осколочного потока  $D_{пот}$  для трех расчетных вариантов задачи 1, расчетные данные по методике SPH ПП

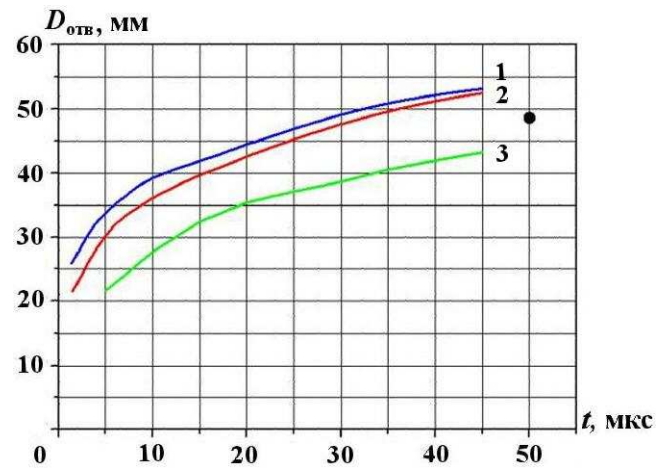


Рис. 4. Диаметр отверстия в зависимости от времени: 1 — расчет, вариант 1–2; 2 — расчет, вариант 1–3; 3 — расчет из [2]; • — опытная точка [2]

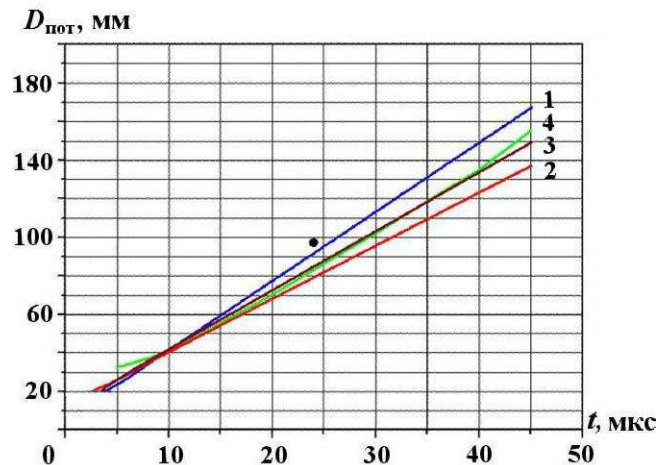


Рис. 5. Зависимости диаметра запреградного осколочного потока от времени: 1 — расчет, вариант 1–2; 2 — расчет, вариант 1–3; 3 — расчет, вариант 1–5; 4 — расчет из [2]; • — опытная точка [2]

KERNEL из [2] и опытная точка. Эти данные также согласуются между собой.

Отметим некоторые тенденции. При меньшем количестве расчетных частиц  $N_1 \approx 67$  тыс. и фиксированном  $h_{отн} = 1,2$  значение  $D_{пот}$  несколько больше, чем при большем количестве частиц  $N_2 \approx 226$  тыс. Увеличение  $h_{отн}$  до 1,4 (вариант 1–5) приводит к уменьшению  $D_{пот}$ , приближению значений  $D_{пот}$  из варианта 1–5 к значениям из варианта 1–3 с увеличенным количеством частиц.

На рис. 6 приведены характерные зависимости скоростей  $U_{xлч}(t)$  лидирующих частиц потока в направлении оси  $X$  и соответствующие зависимости для координат  $X_{лч}(t)$ . В качественном отношении во всех расчетных вариантах соответствующие зависимости одинаковы. Они свидетельствуют о том, что длительность нестационарной

стадии взаимодействия ударника и диска не превышает 9 мкс. После этого движение частиц происходит практически с постоянной скоростью  $U_{sxлч}$  (квазистационарная стадия).

Значения  $U_{sxлч}$  приводятся в табл. 3 для всех расчетных вариантов. В этой таблице приводятся также расчетные значения интервала времени  $t_{1s}$  от момента удара до достижения частицами расстояния  $X = X_s = 208$  мм, на котором в опыте на дополнительном алюминиевом диске был установлен датчик, фиксирующий время начала воздействия частиц потока на этот диск (время срабатывания датчика регистрировалось с погрешностью  $\leq 0,1$  мкс).

Расчетное время  $t_{1s}$  для алюминиевых частиц на 7–15 % меньше опытного  $t_{1sоп} = 39,0$  мкс. Среднее расчетное время  $t_{1s}$  для стальных частиц на 0,8 мкс превышает опытное. Возможно, чувствительность измерительного датчика к мелкораздробленным алюминиевым частицам оказалась несколько заниженной.

Значения скоростей алюминиевых частиц в квазистационарной стадии составляют в основном 0,9 от начальной скорости  $V_0$ . Это согласуется с расчетными данными [2]. В варианте 1–4 при минимальном значении параметра  $a = 0$  получена наибольшая расчетная скорость лидирующих алюминиевых частиц  $U_{sxлч}$ , но она превышает  $U_{sxлч}$  из варианта 1–3 всего на 3 % и несколько превышает  $V_0$ . Для стали влияние  $a$  еще более слабое.

Скорости стальных лидирующих частиц раздробленного ударника во всех расчетах получены близкими,  $\approx 0,86 V_0$ . Поперечный размер  $d_{п}$  компактной зоны раздробленных частиц ударника при  $t = 40$  мкс составляет около 60 мм ( $\approx 4,4d_y$ ) для всех вариантов расчетов, кроме варианта 1–3 (с увеличенным количеством частиц); в этом варианте  $d_{п} \approx 74$  мм  $\approx 5,5d_y$ .

Таблица 3

Расчетные значения  $U_{sxлч}$  и  $t_{1s}$

Номер варианта расчета	$U_{sxлч}$ , м/с		$t_{1s}$ , мкс	
	Алюм. част.	Сталь. част.	Алюм. част.	Сталь. част.
1–1	6 000	5 290	34,5	40,2
1–2	6 000	5 290	34,5	40,0
1–3	6 130	5 500	33,9	38,7
1–4	6 290	5 340	33,0	39,4
1–5	5 730	5 270	36,2	40,4

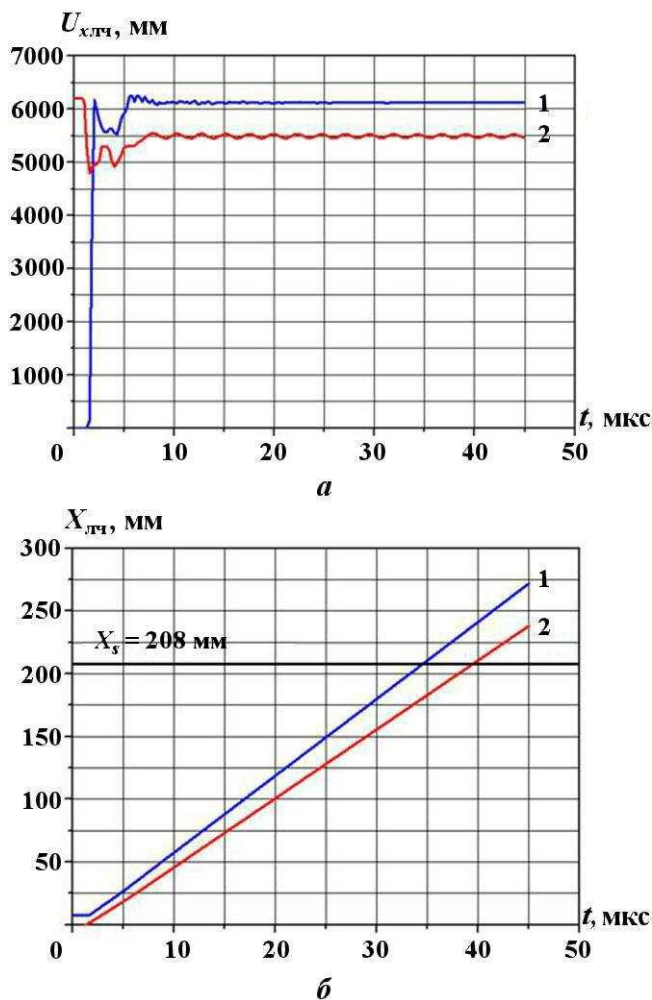


Рис. 6. Графики изменения во времени скоростей  $U_{xлч}$  (а) и координат  $X_{лч}$  (б) лидирующих частиц, вариант расчета 1–3: 1 – АМг-6; 2 – ЭП-637



Рассмотрим далее кратко результаты расчетов задачи 2 плоского соударения дисков. Как указывалось, основной целью численного моделирования этой задачи являлось определение зависимостей от времени характерных параметров (давления  $P$  и массовой скорости  $u$ ) на ударно-волновой стадии процесса.

Аналитические расчеты распада разрыва для задачи 2 при  $V_0 = 6,21$  км/с дали следующие начальные параметры:  $P = 121,5$  ГПа; массовая скорость вещества в направлении оси  $X$  за фронтом УВ в диске из АМГ-6  $u_{ал} = 4184$  м/с, скорость УВ  $D_{ал} = 11254$  м/с; массовая скорость за фронтом УВ в стальном диске (ЭП-637)  $u_{ст} = 2026$  м/с, соответствующая скорость УВ  $D_{ст} = 7486$  м/с ( $u_{ст}$ ,  $D_{ст}$  соответствуют системе координат, связанной со стальным диском). Время движения УВ по толщине алюминиевого диска  $t_{УВал} = 0,89$  мкс. В соответствии с теорией при  $t < t_{УВал}$  в обоих дисках после прихода в рассматриваемую зону фронта УВ реализуется течение с постоянным давлением и массовыми скоростями, указанными выше.

На рис. 7 приводятся графики  $P(t)$ ,  $u_{ал}(t)$  для пяти точек по толщине алюминиевого диска (в его срединной зоне, с начальными координатами  $X_i$  от 1 (точки А, В) до 9 мм (точка Е)) для варианта 2–2 с количеством частиц  $\approx 847$  тыс. ( $d_{чал} = 0,5$  мм). Для варианта 2–1 зависимости  $P(t)$ ,  $u_{ал}(t)$  аналогичны.

Видно, что графики  $P(t)$ ,  $u_{ал}(t)$  имеют осциллирующий характер. Максимальные амплитуды осцилляций относительно теоретических значений составляют по давлению от  $-54$  до  $+76$  ГПа, по массовой скорости — от  $-1710$  до  $+2320$  м/с.

Осциллирующий характер рассматриваемых зависимостей присущ практически всем схемам численного моделирования разрывных течений, в том числе методике SPH [7]. Уровни подобных осцилляций могут быть снижены в последующем, в частности, путем оптимизации параметров искусственной вязкости в алгоритме расчета.

### Заключение

Численное моделирование по методике SPH ПП ЛОГОС ряда задач взаимодействия сферического стального ударника массой 10 г с алюминиевым диском толщиной 8 мм с начальной скоростью 6,21 км/с продемонстрировало, что полученные в рассмотренных задачах результаты яв-

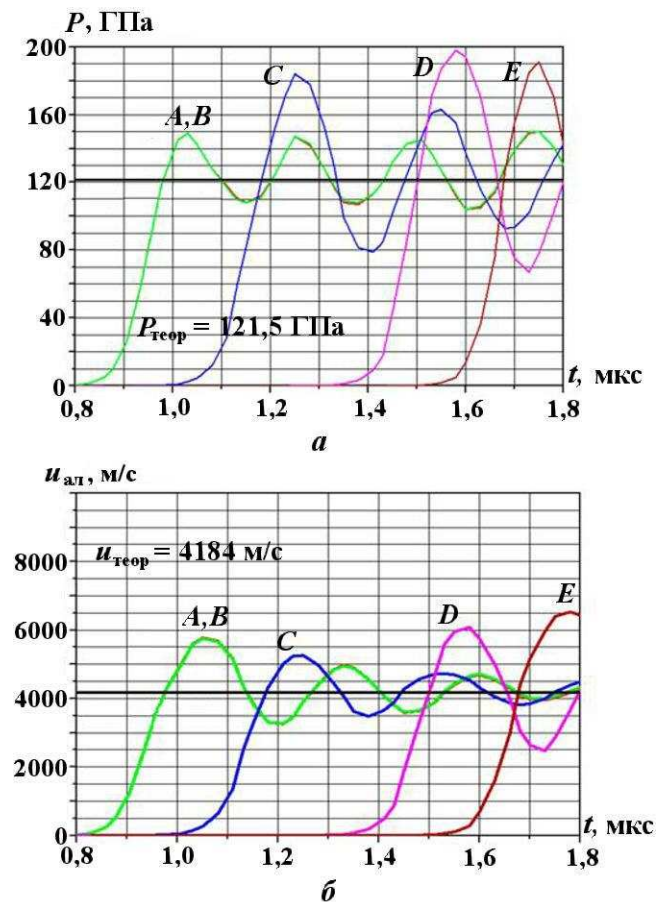


Рис. 7. Зависимости давления (а) и массовой скорости (б) от времени в расчете 2–2 в пяти точках по толщине диска из АМГ-6

ляются достаточно устойчивыми и удовлетворительно согласуются с имеющимися опытными и расчетными данными.

На ударно-волновой стадии плоского взаимодействия дисков с той же начальной скоростью получены осцилляции давления и массовой скорости относительно постоянных теоретических значений. Уровни подобных осцилляций в последующем могут быть снижены, в частности, путем оптимизации параметров искусственной вязкости в алгоритме расчета.

Следует также отметить, что для расширения области применения методики SPH в составе ПП ЛОГОС необходимо введение в нее моделей поведения материалов, учитывающих термическое разупрочнение, а также расширение типов применяемых критериев разрушения. Работа по данным направлениям ведется разработчиками ПП ЛОГОС.

Авторы выражают благодарность сотрудникам РФЯЦ-ВНИИЭФ А. В. Казанцеву и А. Е. Павлуниной за плодотворное обсуждение результатов работы в ходе ее выполнения.

### Список литературы

1. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц // XV Межд. конф. "Супервычисления и математическое моделирование". Саров, 13—17 октября 2014 г.
2. Башуров В. В., Бухарев Ю. Н., Терёшин А. И., Тверсков А. В. Численное моделирование по программе SPH процессов соударения сферических ударников с преградами со скоростями 1—6 км/с // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Сб. докл. II науч. конф. ВРЦ РАРАН. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 23—33.
3. Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Симонов Г. П. и др. Результаты верификации моделей упругопластического деформирования и разрушения, реализованных в пакете ЛЭГАК-ДК // Тр. XII межд. конф. "Супервычисления и математическое моделирование", 11—15 октября 2010 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 163—173.
4. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
5. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
6. Акашева Е. П., Бухарев Ю. Н., Корсакова Е. И., Циберев К. В. Применение пакета программ ЛОГОС для трехмерного моделирования задач взаимодействия ударников с металлическими преградами со скоростями 750—1330 м/с / Тр. XIV межд. конф. "Супервычисления и математическое моделирование", 1—5 октября 2012 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 9—15.
7. Потапов А. П., Ройз С. Н., Петров И. Б. Моделирование волновых процессов методом сглаженных частиц (SPH) // Математическое моделирование. 2009. № 7. С. 20—28.

Статья поступила в редакцию 29.09.15.

NUMERICAL SIMULATION OF IMPACTS OF STEEL IMPACTORS AND ALUMINUM TARGETS AT A VELOCITY OF 6.2 KM/S USING SPH CODE OF LOGOS SOFTWARE PACKAGE / I. V. Kovalenko, N. A. Zhavoronkova, E. I. Lipenkova, Yu. N. Bukharev (SarPhTI, Sarov, Nizhny Novgorod region; NNRU MEPhI, Moscow)

The paper describes several problems of a high-speed impact and presents results of the 3D simulation for these problems using the SPH code of LOGOS software package developed at FSUE "RFNC-VNIIEF" (Sarov, N. Novgorod region). The work objective was to obtain verification data for the conditions of interaction at a velocity of 6.2 km/s between a disc-shaped target made of aluminum alloy AMg-6 and an impactor (a sphere, or a disc) made of steel EP-637 by comparing results of simulations with the earlier published data of experiments and results of simulations using other codes.

*Keywords:* numerical simulation, high-speed impact, SPH code, LOGOS software package, impactor, target.