

## ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ С ЭЛЕМЕНТАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ<sup>1</sup>

Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., Черепанов Р.О.

*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета, г. Томск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Исследованы процессы высокоскоростного взаимодействия текстолита и стекла с алюминиевыми и стальными частицами, моделирующими техногенный космический мусор, а также с ледяными и гранитными частицами, моделирующими естественные материалы природных космических тел. Объектами исследования данной работы являлись процессы деформирования и разрушения элементов космических аппаратов из стекла и текстолита при воздействии высокоскоростных частиц естественного и техногенного происхождения. Для этого проводились эксперименты с легкогазовой установкой по метанию микрочастиц со скоростью до 7 км/сек и разработка математических моделей соударения частиц с различными преградами. Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий. Также в работе используется вариант метода SPH. Численный метод основан на использовании слабой вариационной постановки. Параметр сглаживания рассматривается как скрытая переменная состояния и учитывает ее влияние на физические процессы: изменение параметра сглаживания отдельных узлов эквивалентно изменению соответствующего относительного объема, что влияет на напряженно-деформированное состояние материала и как следствие – является специфической формой деформирования, что явно учитывается в расчете. Расчет ускорений узлов основывается на определении обобщенных сил, которые находятся из оценки влияния перемещения узлов на поле деформации в их окрестностях (вместо непосредственного дифференцирования поля напряжений). Эффективность исследований определилась наличием как уникальных установок для высокоскоростного метания твердых тел, так и комплексным численным моделированием исследуемых явлений. Предложенные в работе подходы к моделированию взаимодействия частиц космического мусора и элементов космических аппаратов позволяют рассчитывать напряженно-деформированное состояние, разрушение и фрагментацию стеклянных и текстолитовых элементов космических аппаратов в трехмерной постановке при высокоинтенсивном нагружении.

**Ключевые слова:** высокоскоростной удар; разрушение; фрагментация; космический мусор; космические аппараты

## HIGH-SPEED INTERACTION OF NATURAL AND TECHNOGENIC PARTICLES WITH ELEMENTS OF SPACE APPLIANCES

Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F., Cherepanov R.O.

*Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University,  
Tomsk, Russia*

<sup>1</sup>Работа поддержана Российским научным фондом (РНФ) в рамках проекта № 16-19-10264.

## ABSTRACT

The paper represents the study concerning the high-velocity interaction of textolite and glass with aluminum and steel particles which simulate technogenic space debris, as well as with ice and granite particles which simulate natural materials of natural space bodies. The processes of deformation and fracture of the glass and textolite space vehicles elements exposed to high-velocity particles of natural and technogenic origin were the objects of the study in this work. In the experiments, the light-gas installation was used to accelerate microparticles with a velocity up to 7 km/s, and the mathematical models were developed to simulate the impact of particles with different targets.

To compute elastoplastic flows, the tetrahedral cells are used to apply a technique that is based on combined using the Wilkins method for the calculation of internal body points and the Johnson method for the calculation of contact interactions. The variant of the SPH method is also used in the work. The numerical method is based on the use of a weak variational formulation. The smoothing parameter is considered to be a hidden state variable and takes into account its effect on physical processes: the change of the smoothing parameter for separate nodes is equivalent to the change of the corresponding relative volume, which influences on the stress-strain state of material, and as a result, is a specific form of deformation that is considered in the computation. The computation for the acceleration of nodes is based on the definition of summarized forces which are determined by estimating the effect of the node movement on the strain field in the neighborhood of nodes (instead of the direct differentiation of the stress field). The effectiveness of the research was determined by the presence of both unique facilities for high-speed throwing of solid bodies and by complex numerical modeling of the phenomena under study. The approaches proposed to simulate the interaction of space debris and the elements of space vehicles allow the stress-strain state, fracture and fragmentation of glass and textolite space vehicle elements to be computed in the three-dimensional formulation under high-intensity loading.

**Keywords:** high-velocity impact; fracture; fragmentation; space debris; space vehicles

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стойкости элементов космических аппаратов из стекла и текстолита представляет собой важную практическую задачу. Данные материалы используются в качестве элементов конструкции космических аппаратов: иллюминаторов, стекол оптических приборов, теплозащитных экранов и т.д. Исследовать процессы взаимодействия стекла и текстолита с потоками техногенных и естественных осколков необходимо как с точки зрения сохранения целостности космических аппаратов при ударе достаточно крупными осколками, так и с целью уменьшения эрозии элементов конструкций при действии потоков ультрамелких частиц. Поэтому теоретически-экспериментальное определение предельной стойкости элементов конструкции КА при воздействии высокоскоростных частиц представляется весьма актуальной с практической точки зрения. В данной работе проводится теоретико-экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия компактных ударников с преградами конечной толщины из стекла и текстолита. Рассматривается соударение с алюминиевыми и стальными частицами, моделирующими космический мусор и с частицами льда и гранита, моделирующими естественные частицы космических тел.

Для исследования процессов высокоскоростного взаимодействия разработан, изготовлен, смонтирован и запущен экспериментальный стенд, включающий универсальную станину, на которой может быть установлена любая из имеющихся

в НИИ ПММ метательных установок (Т-29, ППХ 23/8, ППХ 34/8, ППХ 34/23/8, ГДИ 50/23, а также новая трехступенчатая легкогазовая установка по патенту РФ № 2490580) и вакуумируемую камеру. Стенд оснащен аппаратурой для измерения динамических давлений в стволах, а также датчиками дульной и траекторной скорости моделей и ударников, в том числе оригинальными датчиками по патенту РФ № 2193207. Стенд позволяет вести разнообразные исследования процессов высокоскоростного соударения при скоростях до 8 км/с и выше. Уникальность стенда состоит в том, что станина для метательной установки и вакуумируемая камера смонтированы на единой подвесной платформе. Это позволяет исключить негативное влияние выстрела на фундамент здания.

### 1. УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЕ СЖИМАЕМОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. В общем случае они имеют следующий вид [1-2]

уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

уравнения движения

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\rho \frac{dE}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (3)$$

где  $x_i$  – координаты;  $t$  – время;  $\rho_0$  – начальная плотность среды;  $\rho$  – текущая плотность среды;  $v_i$  – компоненты вектора скорости;  $F_i$  – компоненты вектора массовых сил;  $S_{ij}$  – компоненты девиатора тензора напряжений;  $E$  – удельная внутренняя энергия;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты девиатора тензора скоростей деформаций;  $P$  – давление.

К уравнениям (1)-(3) необходимо добавить уравнения, учитывающие соответствующие термодинамические эффекты, связанные с адиабатным сжатием среды и прочностью среды. В общем случае при воздействии сил на твердое деформируемое тело происходит изменение, как объема (плотности), так и формы тела, причем по различным зависимостям. Поэтому тензор напряжений представляется в виде суммы шарового тензора и девиатора тензора напряжений

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - P\delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

$$\delta_{ij} = 1, \quad i = j,$$

$$\delta_{ij} = 0, \quad i \neq j,$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Для описания сопротивления тела сдвигу, используем следующие соотношения

$$2\mu(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}) = \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij}; \quad (4)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik}; \quad (5)$$

$$2\omega_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i}; \quad (6)$$

$$2e_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad (7)$$

а также условие пластичности

$$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij} = \frac{1}{3}\sigma^2, \quad (8)$$

где  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\mu$  – модуль сдвига;  $\sigma$  – динамический предел текучести;  $D/Dt$  – производная Яумана.

Уравнение состояния твердого тела выбиралось в форме Ми-Грюнайзена

$$P = \frac{K(1 - \Gamma_0 \xi / 2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \rho_0 \Gamma_0 E, \quad (9)$$

где  $\Gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена;  $c, K$  – константа материала;  $\rho_0$  – начальная плотность среды;  $\xi = 1 - \rho_0 / \rho$ .

Кроме того, учитывалось, что при высокоскоростном взаимодействии могут реализовываться два механизма разрушения: сдвиговой и откольный. В качестве критерия сдвигового разрушения использовались критерий предельной эквивалентной пластической деформации [3]  $\varepsilon^p = \varepsilon_*^p$ . В этом случае при достижении  $\varepsilon^p$  предельного значения  $\varepsilon_*^p$  расчетная ячейка считается разрушенной. Система уравнений (1)-(9) записана в общем виде для пространственного движения деформируемого тела.

Для расчета разрушения пластичных материалов (алюминий, сталь) также использовались соотношения Джонсона-Кука [7].

Предел текучести

$$\sigma = (A + B\bar{\varepsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}),$$

где  $\bar{\varepsilon}^p$  – эквивалентная пластическая деформация,

$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0, \dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ,  $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ ,  $A, B, C, n, m$  – параметры материала.

$$\text{Критерий разрушения } D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f},$$

где  $\Delta \varepsilon$  – приращение эквивалентной пластической деформации в течение цикла интегрирования,  $\varepsilon^f$  – деформация разрушения при данной скорости деформации, температуре, давлении, эквивалентном напряжении,

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*]$$

$\sigma^* = P / \sigma_{eff}$ ,  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  – параметры.

Для расчета разрушения хрупких материалов (стекло, лед, гранит) использовались соотношения Джонсона-Холмквиста (JH2) [8].

Материал в модели JH2 описывается, фактически, как упруго-пластический с резким накоплением поврежденности на коротком отрезке «текучести», под которой подразумевается накопление поврежденности  $D$  при выходе напряжений за круг текучести.

Предел текучести для частично разрушенного материала

$$[\sigma] = [\sigma]_i + D([\sigma]_i - [\sigma]_f)$$

где  $[\sigma]_i = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$  – предел текучести неразрушенного материала,

$[\sigma]_f = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$  – предел «текучести» полностью разрушенного

материала,  $A, B, C, N, M, T^*$  – константы материала,  $\dot{\varepsilon}^*$  – интенсивность

скорости деформации,  $P^* = \frac{P}{P_{HEL}}$  – нормализованное давление.

При этом кинетика поврежденности описывается уравнением

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}_p^f} \frac{d\varepsilon_p}{dt}$$

где  $\frac{d\varepsilon_p}{dt}$  – интенсивность скорости пластических деформаций,  $\dot{\varepsilon}_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2}$

– предельная интенсивность пластических деформаций,  $D_1, D_2$  – константы материала.

Давление учитывает изменения в материале за счёт «разбухания» при разрушении

$$P^{n+1} = \begin{cases} K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P^{n+1}, & \mu > 0 \\ K_1\mu, & \mu \leq 0 \end{cases}$$

где  $\mu = \frac{\rho^{n+1}}{\rho_0} - 1$ ,  $\rho_0$  – начальная плотность,  $K_1, K_2, K_3, \beta$  – константы материала,

$$\Delta P^{n+1} = -K_1\mu + \sqrt{(K_1\mu + \Delta P^n)^2 + 2\beta K_1 \Delta U}.$$

Уменьшение упругой энергии в разрушающемся материале

$$\Delta U = U(D_n) - U(D_{n+1}),$$

где  $U(D) = \frac{[\sigma]}{6G}$ ,  $G$  – модуль сдвига.

Система основных уравнений дополняется необходимыми начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки ударника имеют осевую скорость  $V_0$  с учетом ее знака, а состояние преграды предполагается невозмущенным. Граничные условия ставятся следующим образом: на границах, свободных от напряжений, выполняются условия:  $\sigma_n = \tau_n = 0$ . На участке контакта между телами ставится условие идеального скольжения одного материала относительно другого вдоль касательной и условие непротекания по нормали:  $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}$ ,  $v_{n1} = v_{n2}$ ,  $\tau_{n1} = \tau_{n2} = 0$ , где  $\sigma_n, \tau_n$  – нормальная и касательная компоненты вектора напряжений;  $v_n$  – нормальная компонента вектора скорости в точке контакта; индексы 1 и 2 относятся

к контактирующим телам.

Трехмерное моделирование взаимодействия преград с высокоскоростными ударниками базируется на уравнениях, описывающих пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, которые являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий [1,4-5]. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. Процесс разрушения стекла, льда, гранита рассматривался, как процесс разрушения хрупкого материала, без участка пластического деформирования, характерного для деформирования металлов.

Также в работе используется вариант метода SPH [9]. Численный метод основан на использовании слабой вариационной постановки. Параметр сглаживания рассматривается как скрытая переменная состояния и учитывает ее влияние на физические процессы: изменение параметра сглаживания отдельных узлов эквивалентно изменению соответствующего относительного объема, что влияет на напряженно-деформированное состояние материала и, как следствие, является специфической формой деформирования, что явно учитывается в расчете. Расчет ускорений узлов основывается на определении обобщенных сил, которые находятся из оценки влияния перемещения узлов на поле деформации в их окрестностях (вместо непосредственного дифференцирования поля напряжений).

Аппроксимация частных производных осуществляется с использованием матрицы коррекции. В случае если ее обусловленность становится плохой, используется классическая SPH-аппроксимация. Ядерная аппроксимация, используемая в SPH

$$f^i \cong \int f(\vec{x})W(\vec{x} - \vec{x}^i, h)d\vec{x}$$

Пробная функция: четырехкомпонентный вектор:  $\{1, x_0, x_1, x_2\}$

$$\Delta(\vec{x}, \vec{y})_{\alpha} = \begin{cases} x_{\alpha} - y_{\alpha}; \alpha > -1; \\ 1; \alpha = -1; \end{cases}$$

Аппроксимация градиента пробной функции – матрица T

$$T_{\beta\alpha}(\vec{x}) = \int \Delta(\vec{y}, \vec{x})_{\alpha} W_{,\beta}(\vec{y} - \vec{x})d\vec{y};$$

Матрица коррекции позволяет восстановить узловую согласованность и повысить точность аппроксимации

$$B_{\alpha\beta}(\vec{x}) = [T_{\alpha\beta}(\vec{x})]^{-1}$$

В реальных материалах процесс разрушения всегда определяется внутренней структурой среды, наличием неоднородностей, как правило, вызванных различной ориентацией зерен в поликристаллическом материале или неоднородностями в составе композиционных материалов, различием в микропрочности внутри зерна и на межзеренной или межфазной границе. Поэтому для повышения адекватности численно моделируемого процесса экспериментальным данным необходимо внести возмущения в физико-механические характеристики разрушаемой среды, т.е. случайное распределение

факторов, определяющих прочностные свойства материала. Введение в методику расчета сведений о поликристаллической структуре материала требует большого количества экспериментальных данных и повышенных требований к мощностям вычислительной техники, что ограничивает возможности реализации и применения подобного подхода. В связи с этим, в работе используется упрощенный вариант моделирования вероятностного механизма разрушения. Физико-механические характеристики среды  $\xi_i$ , отвечающие за прочность, считаются распределенными случайным образом по объему материала. Плотность вероятности распределения данных параметров  $\frac{dp}{d\xi_i} = f_i(\xi_i, \xi_{0i}, D_i, \Omega_j)$  берется в виде различных законов распределения  $f_i$ , в общем случае зависящих от табличного (среднего) значения  $\xi_{0i}$  распределяемого параметра, варьируемой дисперсии  $D_i$  распределения данного параметра, и прочих характеристик среды  $\Omega_j$ . Такие параметры, как предел текучести, предел прочности, максимальные деформации и прочие константы, определяющие момент наступления разрушения в различных теориях прочности и критериях разрушения, напрямую зависят от числа и размера дефектов и должны быть распределены по объему случайным образом, с дисперсией, зависящей от однородности материала. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьируемой дисперсией. Наиболее полно идеология и методология применения вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в монографии [6].

При решении задач в трехмерной постановке учитывается естественная неоднородность структуры реальных материалов, влияющая на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющаяся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Учет данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела возможен при применении вероятностных законов распределения физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции. Естественная фрагментация ударников и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала. Начальные неоднородности материала учитываются вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Исследование воздействия космической пыли на иллюминаторы космически аппаратов проводились на трехступенчатой пневмо-легкогазовой (пневмо-ЛГУ) баллистической установке. Для реализации на экспериментальном стенде НИИ ПММ ТГУ выбрана схема трехступенчатой ЛГУ с использованием сжатого газа [6].



Рис.1. Трехступенчатая пневмо-легкогазовая баллистическая установка.



Рис.2. Первая пневмоступень.

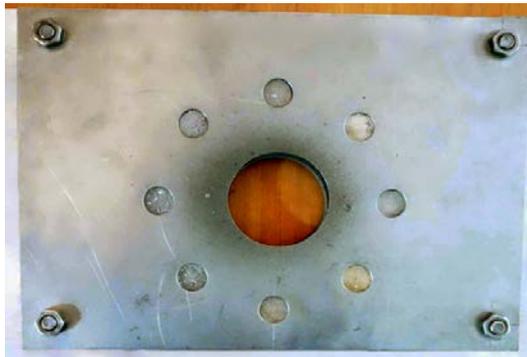


Рис.3. Конструкция мишени для сравнительных испытаний.

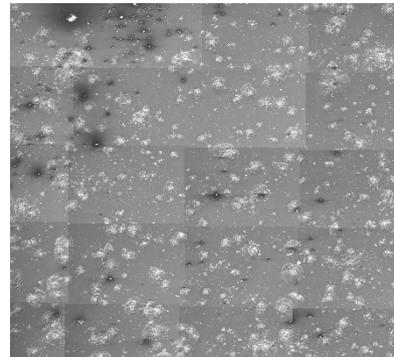


Рис.4. Результаты испытаний (порошок Fe 50 мкм).

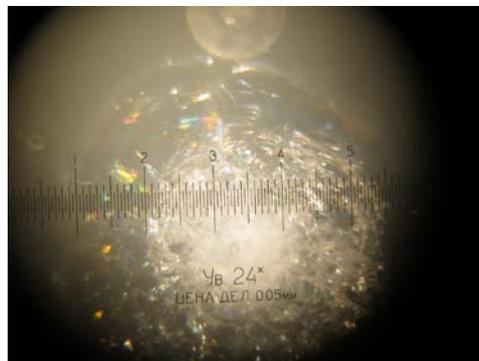


Рис.5. Взаимодействие пластины из стекла К8 с частицей без прочности и с плотностью 1 г/см<sup>3</sup> (моделирование шарика силикагеля).

Размеры пластины 0,3×0,3×0,3 мм, диаметр шарика 50 микрон, скорость соударения бралась равной 1, 2, 3 км/сек. Для скорости 1 км/с результаты расчетов приведены на рис.6 [10].

Соударение двухслойной преграды (текстолит СТ-НТ, толщина 8,0 мм + АМг6, толщина 5,0 мм) и ударника (ШХ15, диаметр 12,7 мм) под углом 30° от нормали исследовалось при скоростях 741 м/сек и 962 м/сек. Полученные расчетные значения скоростей ударника после пробития преграды приведены в таблице 1, где они сравниваются с экспериментальными данными [11].

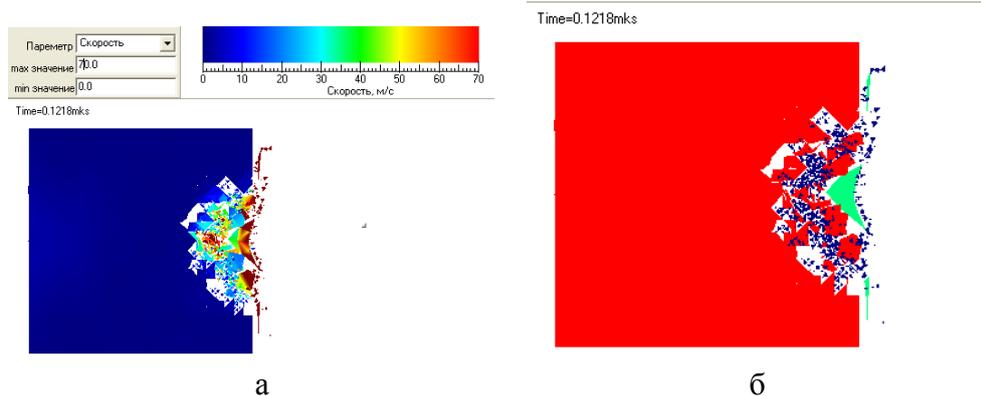


Рис.6. 2-D разрез системы «пластина-шарик» для скорости соударения 1 км/сек для времени  $t = 0,12$  мкс: а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма.

Таблица 1.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей ударника после пробития преграды.

$V_n$ , м/сек	$V_k$ , м/сек, эксперимент	$V_k$ , м/сек, расчет
741	516	490
962	723	700

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривалось соударение со скоростью 3000 м/сек высокоскоростных частиц из алюминия (плотность  $\rho_0 = 2,64$  г/см) и стали (плотность  $\rho_0 = 7,7$  г/см), моделирующих космический мусор и частиц из льда (плотность  $\rho_0 = 0,92$  г/см) и гранита (плотность  $\rho_0 = 2,6$  г/см), моделирующих естественные метеороиды. В качестве преграды брались стекло (плотность  $\rho_0 = 2,53$  г/см) и текстолит (плотность  $\rho_0 = 1,59$  г/см). Преграда из стекла имела размеры: толщина – 25 см, диаметр – 0,6 см, преграда из текстолита: толщина – 0,5 см, диаметр – 1,3 см. В первом случае шарик был диаметром 0,1 см, во втором – 0,2 см.

На рис.7-10 приведены результаты расчетов соударений стеклянной пластины с различными высокоскоростными частицами. Результаты расчета соударения стеклянной пластины со стальным шариком приведены на рис.7.

Удар алюминиевой частицей по стеклянной пластине показан на рис.8.

На рис.9 приведены результаты расчета соударения стеклянной пластины с гранитным шариком.

Удар ледяным осколком по стеклянной пластине приведен на рис.10.

На рис.11-12 приведены результаты расчетов соударений текстолитовой пластины с различными высокоскоростными частицами. Расчет соударения текстолитовой пластины с алюминиевым шариком приведен на рис.11.

Удар ледяным осколком по текстолитовой пластине приведен на рис.12.

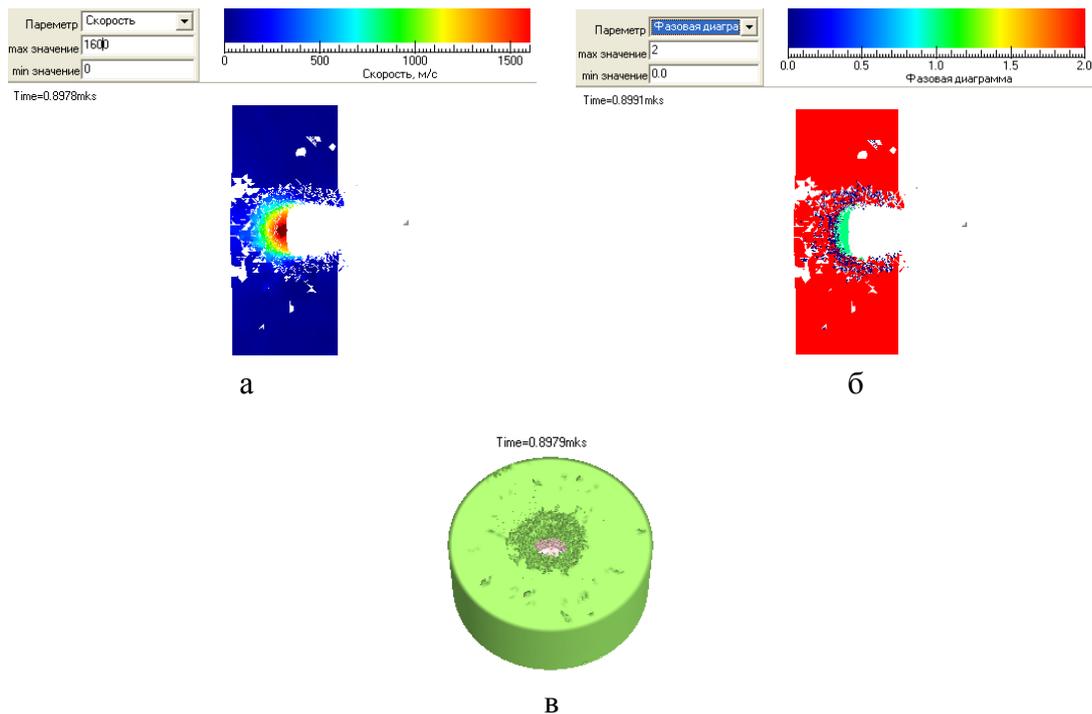


Рис.7. 2-D разрез системы «стеклянная пластина-стальной шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 0,898$  мкс: а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

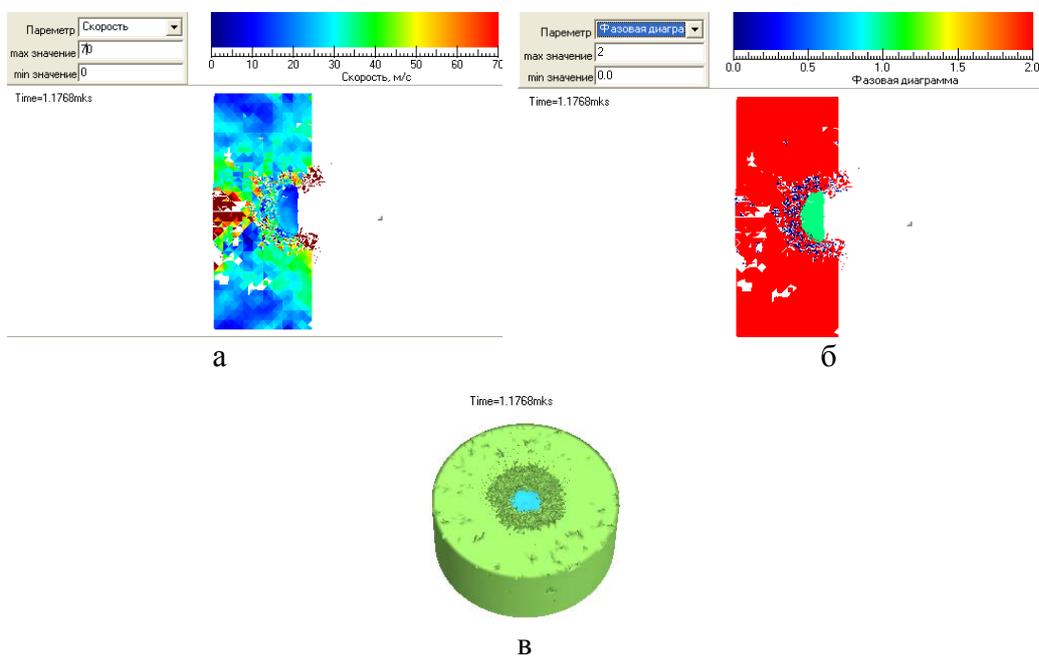


Рис.8. 2-D разрез системы «стеклянная пластина-алюминиевый шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 1,768$  мкс: а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

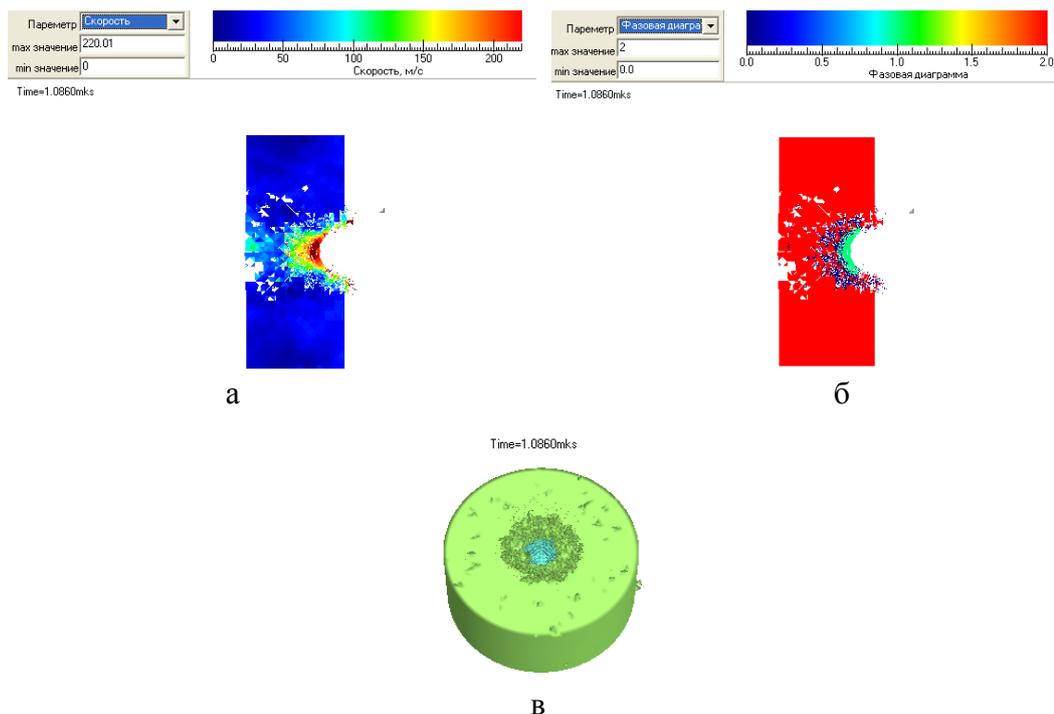


Рис.9. 2-D разрез системы «стеклянная пластина-гранитный шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 1,086$  мкс: а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

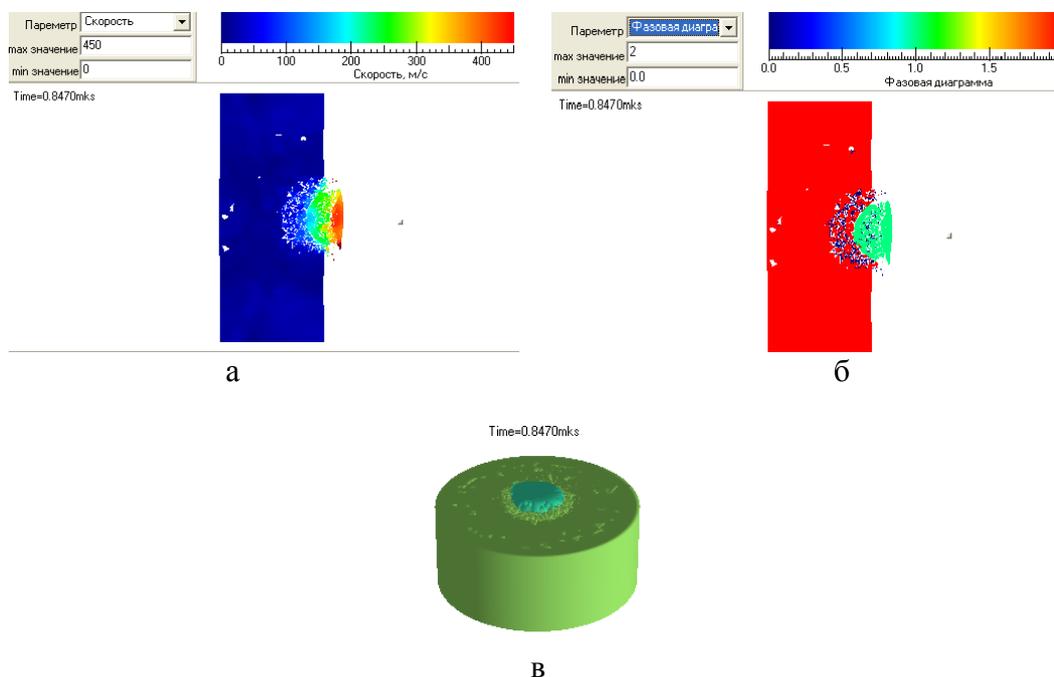


Рис.10. 2-D разрез системы «стеклянная пластина-ледяной шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 0,847$  мкс: а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

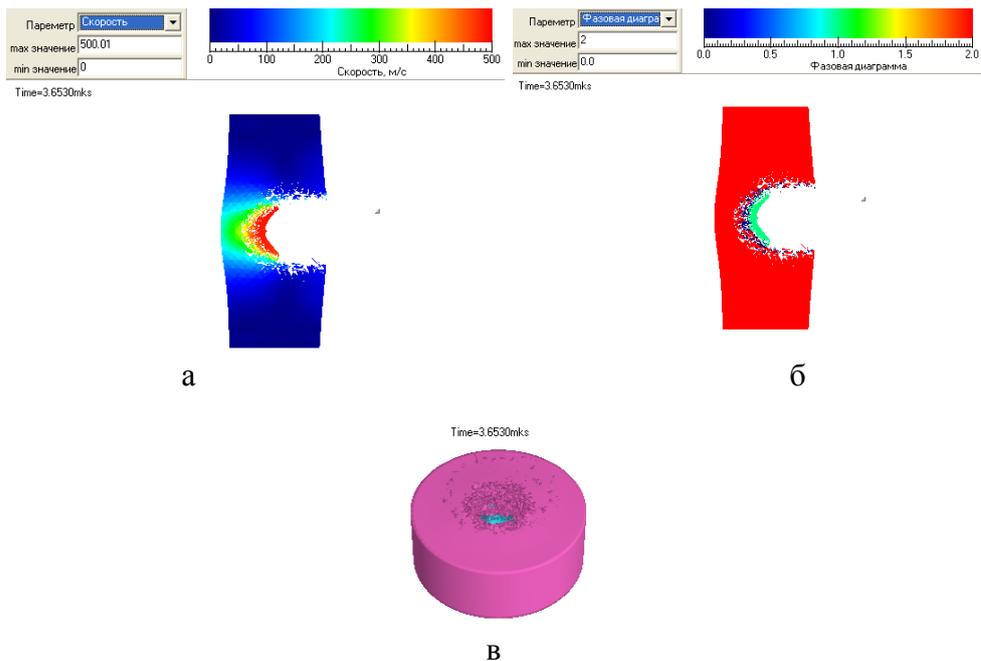


Рис.11. 2-D разрез системы «текстолитовая пластина-алюминиевый шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 3,653 \mu\text{с}$ : а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

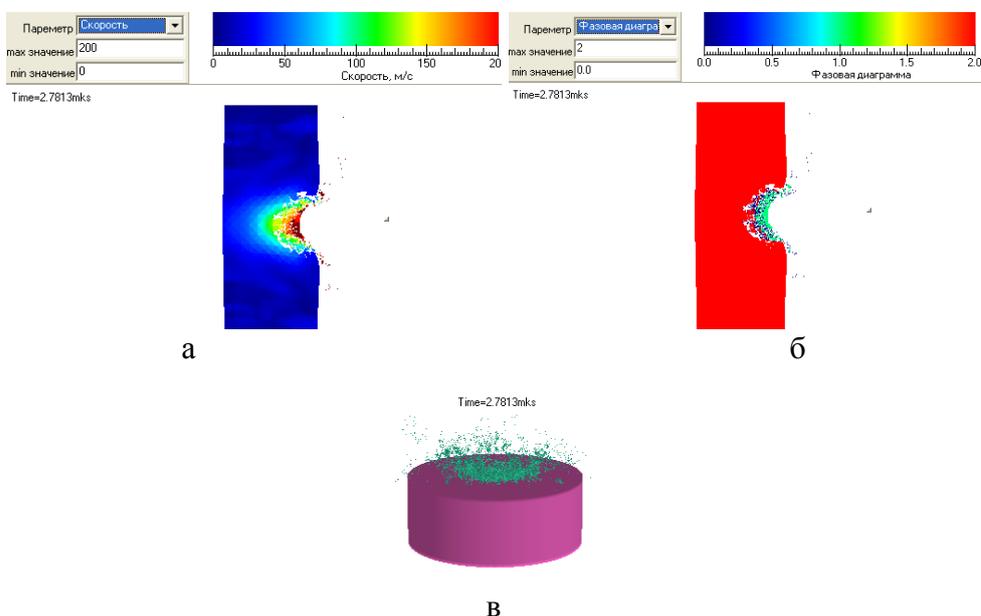


Рис.12. 2-D разрез системы «текстолитовая пластина-ледяной шарик» для скорости соударения 3000 м/сек для времени  $t = 2,7813 \mu\text{с}$ : а – распределение скорости в системе; б – фазовая диаграмма, в – 3D картина соударения.

На приведенных выше фазовых диаграммах показаны распределения скорости внутри пластины и остатков шарика. При ударе происходит хрупкое разрушение стекла и формирование облака фрагментов с частичным выбросом его за пределы кратера. Формирование откольного разрушения наблюдается

на тыльной поверхности стеклянной пластины. Характер разрушения шариков зависит от свойств материалов из которых они изготовлены: хрупкие материалы или упругопластические.

Конечно-разностный метод и метод SPH использовались для моделирования соударения группы из семи сферических стальных частиц с поверхностью стекла. Радиус частиц  $r = 0,5$  мм, они расположены по кругу диаметром  $D_1 = 4,0$  мм. Пластины стекла имели диаметр  $D_2 = 20,0$  мм, толщина пластин  $h = 1,0$  мм. В методе SPH расстояние между пластинами бралось  $0,2$  мм, в конечно-разностном методе расстояние между пластинами бралось  $0$  мм. Начальная скорость частиц  $v = 1,0$  км/с. В расчетах использовалось уравнение состояния типа Ми-Грюнайзена

$$P = \frac{K(1 - \gamma_0 \xi / 2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \gamma_0 E_y; \quad \xi = 1 - V_y; \quad D = a + cu,$$

где  $D$  – скорость УВ,  $u$  – массовая скорость,  $\rho_0$  – начальная плотность,  $V_y$  – относительный объем  $(\rho_0 / \rho)$ ,  $E_y$  – удельная внутренняя энергия,  $\gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена, параметры стекла  $\rho_0 = 2480$  кг/м<sup>3</sup>,  $a = 400$  м/с;  $c = 2,45$ ,  $K = \rho_0 a^2$ ,  $\gamma_0 = 1,17$ , модуль сдвига  $\mu_0 = 34.04$  ГПа, в качестве критерия разрушения использовалась предельная деформация разрушения  $\varepsilon_{frac} = 0,54\%$ .

Для моделирования металлических частиц использовалась упругопластическая модель с параметрами модуль упругости  $E = 200$  ГПа, модуль сдвига  $\mu = 70$  ГПа, предел текучести  $Y_0 = 0,245$  ГПа.



Рис.13. Расчетная схема.

В методе SPH задача решалась в трехмерной постановке, для моделирования верхней пластины использовалось 40000 узлов, для моделирования нижней пластины использовалось 10000 узлов, для моделирования сферических частиц использовалось по 72 узла на каждую сферу.

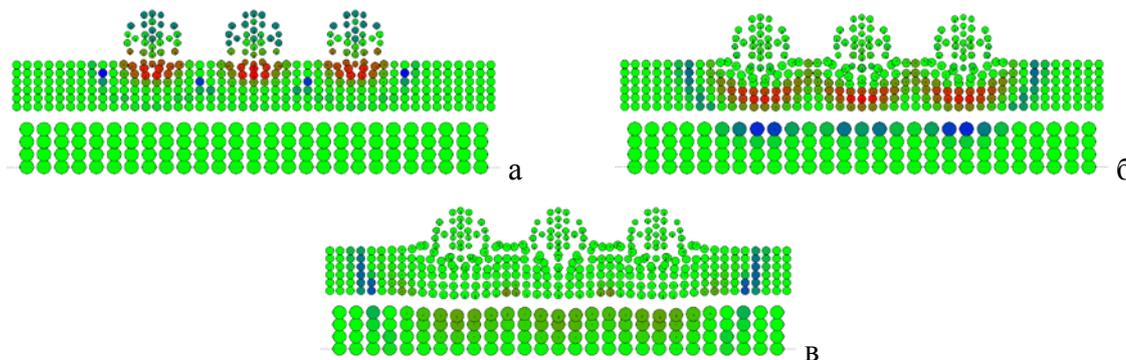


Рис.14. Расчет напряжений методом SPH. 2D сечения расчетной области для различных моментов времени  $t$ : а –  $t = 15$  мкс; б –  $t = 25$  мкс; в –  $t = 35$  мкс. Выделена область поврежденности материала стекла.

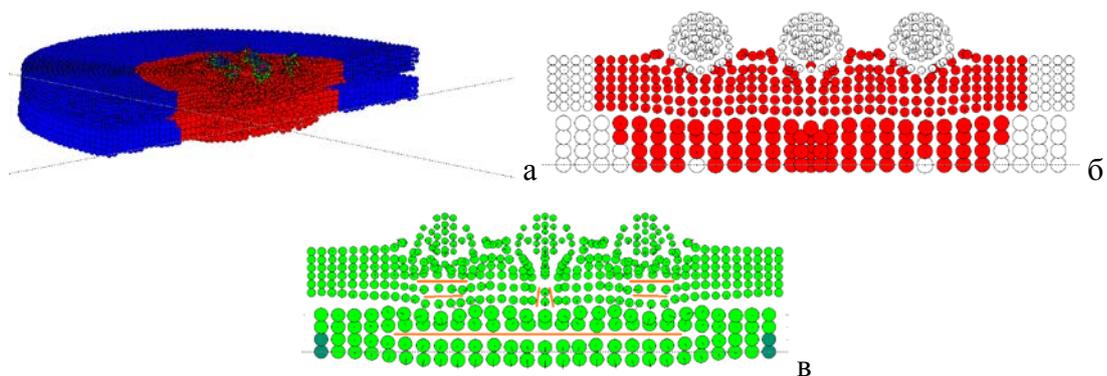


Рис.15. Расчет поврежденности методом SPH: а – 3D конфигурация с зоной поврежденности; б – 2D сечение расчетной области с поврежденностью; в – начало фрагментации ( $t = 50 \mu\text{с}$ ).

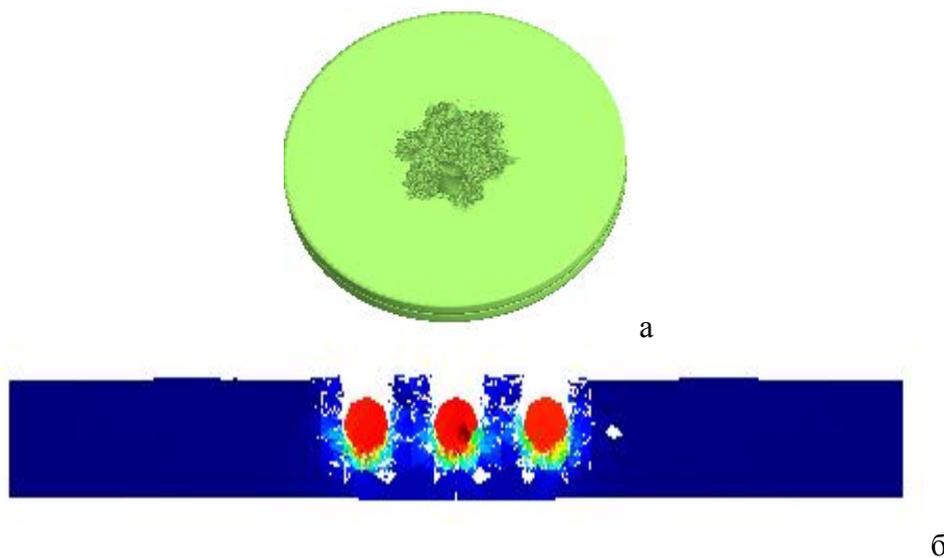


Рис.16. Расчет по сеточному методу (время  $t = 1,7 \mu\text{с}$ ): а – 3D конфигурация; б – 2D сечение расчетной области.

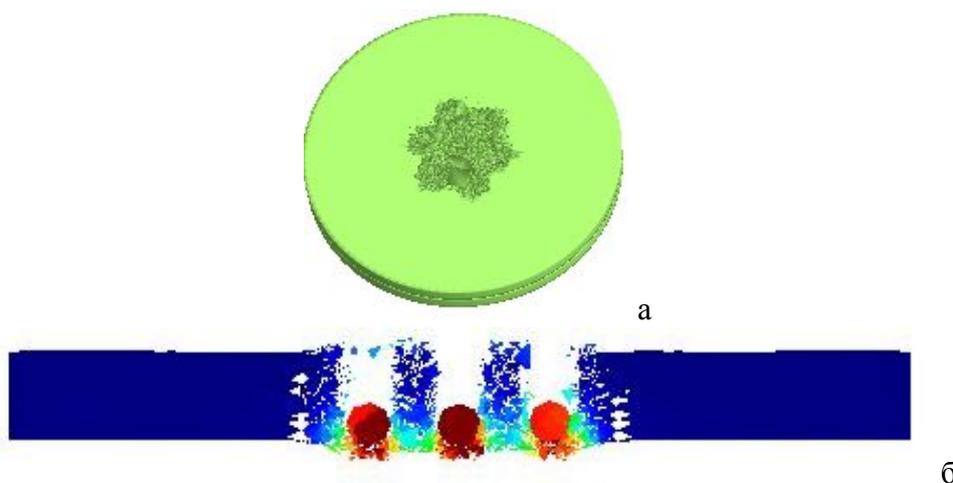


Рис.17. Расчет по сеточному методу (время  $t = 3,57 \mu\text{с}$ ): а – 3D конфигурация; б – 2D сечение расчетной области.

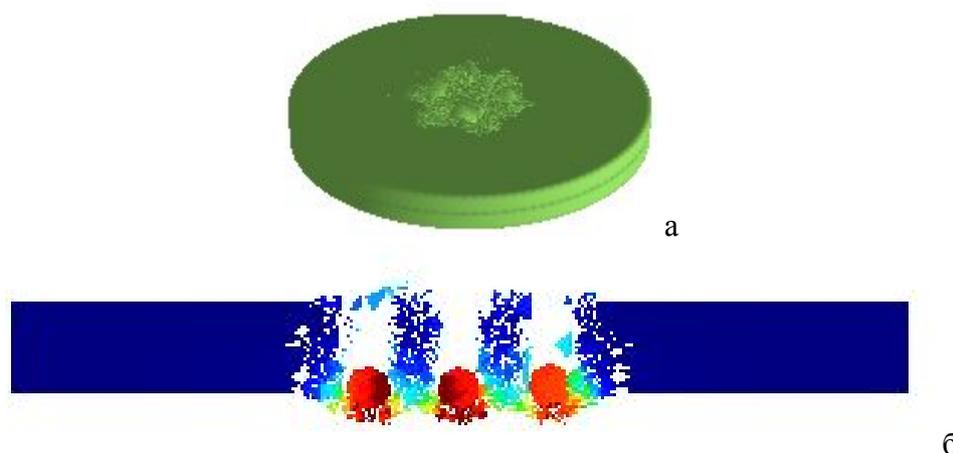


Рис.18. Расчет по сеточному методу (время  $t = 4,2$  мкс): а – 3D конфигурация; б – 2D сечение расчетной области.

Следует отметить, что сеточный метод, использующий вероятностный подход к описанию процесса разрушения соударяющихся тел, позволяет более точно рассчитывать области поврежденного и разрушенного при соударении материала (рис.16-18) по сравнению с методом SPH (рис.14-15). Он также более точен при расчете формирования фрагментов разрушенной преграды и учета взаимодействия последних между собой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение стойкости элементов космических аппаратов из стекла и текстолита представляет собой важную практическую задачу. Исследовать процессы взаимодействия стекла и текстолита с потоками техногенных и естественных осколков необходимо как с точки зрения сохранения целостности космических аппаратов при ударе достаточно крупными осколками, так и с целью уменьшения эрозии элементов конструкций при действии потоков ультрамелких частиц. Поэтому экспериментально-теоретическое определение предельной стойкости элементов конструкции КА при воздействии высокоскоростных частиц представляется весьма актуальной с практической точки зрения.

Объектами исследования данной работы являлись процессы деформирования и разрушения элементов космических аппаратов из стекла и текстолита при воздействии высокоскоростных частиц естественного и техногенного происхождения. Для этого проводились эксперименты с легкогазовой установкой по метанию микрочастиц со скоростью до 7 км/сек и разработка математических моделей соударения частиц с различными преградами. Эффективность исследований определилась наличием как уникальных установок для высокоскоростного метания твердых тел, так и комплексным численным моделированием исследуемых явлений.

Предложенные в работе подходы к моделированию взаимодействия частиц космического мусора и элементов космических аппаратов позволяют рассчитывать напряженно-деформированное состояние, разрушение и фрагментацию стеклянных и текстолитовых элементов космических аппаратов в трехмерной постановке при высокоинтенсивном нагружении.

Следует отметить, что сеточный метод, использующий вероятностный подход к описанию процесса разрушения соударяющихся тел, позволяет более точно рассчитывать области поврежденного и разрушенного при соударении материала по сравнению с методом SPH. Он также более точен при расчете формирования фрагментов из разрушенной преграды и учета взаимодействия последних между собой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уилкинс М.Л. *Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике.* – М.: Мир, 1967. – С.212-263.
2. Wilkins M.L. *Modeling the behavior of materials* / Proc. of the Intern.conf. «Structural impact and crashworthiness». – London; New York, 1984. – Vol.2. – Pp.243-277.
3. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечочки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. *Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями* // Ракет. техника и космонавтика. – 1970. – Т.8.– №12.– С.42-47.
4. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrck D.J. *Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads* // Int. J. Numer. Methods Engng. – 1979. – Vol.14. – №12. – Pp.1865-1871.
5. Johnson G.R. *Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions* // Trans. ASME. J. of Appl. Mech. – 1981. – Vol.48. – N1.– Pp.30-34.
6. *Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент* / Под ред. Герасимова А.В. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 568 с.
7. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. *Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия* // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т.3. – №1. – С.32-43.
8. Егорова М.С., Паршиков А.Н. *Численное моделирование разрушения хрупких материалов методом SPH* // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2015. – Т.16. – Вып.4. – С.1-8.
9. Gerasimov Alexander V., Cherepanov Roman O. *First order accuracy conservative smooth particle method for elastic-plastic flows with contacts and free surfaces* // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol.1783. – Pp.020024-1-020024-4.
10. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., Черепанов Р.О. *Численное моделирование сеточным и бессеточным методами удара группы частиц по стеклу* // Омский научный вестник. Приборы, машины и технологии. Физико-математические науки. – 2015. – №3. – С.316-319.
11. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. *Numerical simulation of the perforation of layered barriers* // Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal. – 2013. – Vol.4. – Iss.2. – Pp.97-111.

## REFERENCES

1. Wilkins M.L. *Calculation of elastic-plastic flow. Methods in Computational Physics.* NY, Academic Press, 1964, Vol.3, Pp.212-263.
2. Wilkins M.L. *Modeling the behavior of materials.* Proc. of the Intern. conf. «Structural impact and crashworthiness», London, New York, 1984, Vol.2, Pp.243-277.

3. Kreinhagen K.N., Vagner M.H., Pechotski J., Bork R.L. *A determination of a ballistic limit at impact with structural targets*. AIAA J, 1970, Vol.8, No.12, Pp.42-47.
4. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. *Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads*. Int. J. Numer. Methods Engng., 1979, Vol.14, No.12, Pp.1865-1871.
5. Johnson G.R. *Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions*. Trans. ASME. J. of Appl. Mech., 1981, Vol.48, No.1, Pp.30-34.
6. *Vysokoskorostnoi udar. Modelirovanie i eksperiment [High-speed impact. Simulation and experiment]*. Pod red. A.V. Gerasimova, Tomsk, Izd-vo NTL, 2016, 568 p.
7. Kuz'kin V.A., Mikhaliuk D.S. *Primenenie chislennogo modelirovaniia dlia identifikatsii parametrov modeli Dzhonsona-Kuka pri vysokoskorostnom deformirovanii aliuminiia [The application of numerical modeling to identify the parameters of the Johnson-Cook model in the high-speed deformation of aluminum]*. Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred, 2010, Vol.3, No.1, Pp.32-43.
8. Egorova M.S., Parshikov A.N. *Chislennoe modelirovanie razrusheniia khrupkikh materialov metodom SPH [Numerical modeling of fracture of brittle materials by the SPH method]*. Fiziko-khimicheskaia kinetika v gazovoi dinamike, 2015, Vol.16, No.4, Pp.1-8.
9. Gerasimov Alexander V., Cherepanov Roman O. *First order accuracy conservative smooth particle method for elastic-plastic flows with contacts and free surfaces*. AIP Conference Proceedings, 2016, Vol.1783, Pp.020024-1-020024-4.
10. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Iu.F., Cherepanov R.O. *Chislennoe modelirovanie setochnym i bessetochnym metodami udara gruppy chastits po steklu [Numerical simulation by grid and non-grid methods of impact of a group of particles on glass]*. Omskii nauchnyi vestnik. Pribory, mashiny i tekhnologii. Fiziko-matematicheskie nauki, 2015, No.3, Pp.316-319.
11. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. *Numerical simulation of the perforation of layered barriers*. Composites: Mechanics, Computations, Applications, 2013, Vol.4, Iss.2, Pp.97-111.

Поступила в редакцию 28 ноября 2016 года

---

Сведения об авторах:

Герасимов Александр Владимирович – д.ф.-м.н., проф., зав. отд., Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: [ger@niipmm.tsu.ru](mailto:ger@niipmm.tsu.ru)

Пашков Сергей Владимирович – к.т.н., с.н.с., Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: [ps@contek.ru](mailto:ps@contek.ru)

Христенко Юрий Федорович. – д.т.н., в.н.с., Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: [hrrs@niipmm.tsu.ru](mailto:hrrs@niipmm.tsu.ru)

Черепанов Роман Олегович – к.ф.-м.н., с.н.с., Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: [cro@mail2000.ru](mailto:cro@mail2000.ru)