

УДК 629.7

## **Моделирование приборных отсеков летательных аппаратов пористо-смесевыми ударниками**

**Калягин М.Ю.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*e-mail: [mukalyagin@yandex.ru](mailto:mukalyagin@yandex.ru)*

### **Аннотация**

В статье рассматривается модель высокоскоростного ударного взаимодействия приборных отсеков ЛА с преградами (подкрепленными панелями). Приборные отсеки моделируются пористо-смесевыми телами, подходящими к преградам под различными углами. Принимается, что в материале панели под действием высокоинтенсивной ударной нагрузки развивается вязкопластическое течение. Предлагаемая модель ударного взаимодействия позволяет получить законы изменения прогибов и скоростей движения панели в функции координат и времени, а также распределение напряжений и температуры. Приведены графические зависимости для некоторых вариантов ударного взаимодействия.

**Ключевые слова:** высокоскоростное взаимодействие, пористые тела, пластический удар, вязко-пластические течения, преграды.

## Введение

Развитие современной авиационной и ракетной техники связано в первую очередь с увеличением скорости полета. Таким образом, математическое описание процессов функционирования высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) является актуальной задачей. Исследования в этой области как правило проходят с применением математических моделей, отвлеченных от реальных конструкций. В статье приведена методика, которая позволяет исследовать высокоскоростное взаимодействие приведенных к реальным приборным отсекам ударников с преградами конечной толщины, в том числе и с подкреплением. Точность расчетов является достаточной для проведения проектных работ.

Соударение тел сопровождаются разнообразными процессами, возникновение и относительная роль которых зависит от их формы и структуры, физических характеристик материалов тел, а так же, что более существенно, от относительной скорости удара [1,2,3,18,19]. При высокоскоростном ударе нагрузки, действующие на тела, характеризуются внезапностью приложения и кратковременностью действия. При этом интенсивность нагрузок может быть достаточно высока, для того, что бы произвести разрушения или большие необратимые изменения в телах, на которые они действуют.

В телах при ударе возникают возмущения различной природы, распространяющиеся с определенными конечными скоростями, в виде волн

нагрузки и отраженных волн, величина которых зависит от состояния тел и характера деформаций [10].

Обычно принято различать ударник и приемник удара. Тело, которым ударяют, называют ударником, тело по которому ударяют, называют приемником удара.

Ударники принято делить на два типа:

- пластические, которые при ударе теряют свою форму и размеры;
- упругие, которые при ударе сохраняют свои размеры и форму.

Для ударников первого типа (пластических) в случае, если напряжения, возникающие при ударе, значительно превышают предел текучести материала ударника при сжатии, в первом приближении принимают, что материал ударника ведет себя как вязкая жидкость [11].

Давление, развиваемое ударником на контактной поверхности в этом случае, определяется по формуле

$$p = \rho_0 V_0^2, \quad (1)$$

а время удара

$$t_y = L / V_0, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность материала ударника,  $V_0$  – относительная скорость удара,  $L$  – длина ударника.

Если ударник идеально-упругое тело, то при ударе о жесткий приемник в нем возникают ударные волны, скорость распространения которых  $V_s$  зависит от физических характеристик тела.

Теория ударных волн в упругих телах основана на трудах Римана, Ренкина и Гюгонио. Уравнения Ренкина-Гюгонио, получены в предположении установившегося во времени профиля ударной волны [8]. Они связывают давление  $p$ , внутреннюю энергию  $E$ , удельный объем  $\nu$  или плотность  $\rho$ , за ударной волной с теми же параметрами перед ударной волной, используя скорость ударной волны  $V_s$  и массовую скорость за ударной волной  $V_p$ . Эти уравнения выражают законы сохранения массы, импульса и энергии. В системе координат, в которой вещество перед фронтом ударной волны находится в покое, они имеют вид:

$$\rho_0 V_s = \rho (V_s - V_p); \quad (3)$$

$$p - p_0 = \rho_0 V_s V_p; \quad (4)$$

$$(E - E_0 - \frac{V_p^2}{2}) \rho_0 V_s = p_0 V_p. \quad (5)$$

Здесь нулевой индекс относится к начальному состоянию.

Для многих материалов  $V_s$  является линейной функцией  $V_p$ , т.е.

$$V_s = a + b V_p. \quad (6)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для ряда конструкционных материалов.

Отклонения от линейности обычно связаны с пористостью материала, фазовыми переходами или значительными упругими волнами. Из формул (3) (6) следует, что давление  $p$ , развиваемое на контактной поверхности, в случае упругого ударника будет определяться выражением [4]

$$p = \rho_0 V_p (a + b V_p), \quad (7)$$

так как  $p \gg p_0$ , а время удара  $t_y$  формулой

$$t_y = \frac{2L}{a + b V_s}. \quad (8)$$

Однако в действительности не наблюдается полного соответствия свойств сплошных, однородных ударников ни свойствам пластических, ни идеально-упругих тел. Это тем более справедливо для ударников, которые должны моделировать ударное взаимодействие приборных отсеков летательного аппарата (ЛА) с преградами.

Приборные отсеки ЛА (см. рис.1) представляют собой, как правило, подкрепленные цилиндрические оболочки, заполненные аппаратурой систем наведения или стабилизации, приводами органов управления и т.д. [5]. При этом элементы, входящие в конструкцию агрегатов и узлов приборных отсеков, выполняются из различных материалов, резко отличающихся по своим физико-механическим характеристикам. Отметим также, что распределение материала по объему отсека крайне неравномерное из-за наличия пустот, что приводит к скачкообразному изменению характеристик ударного процесса по объему отсека. Следовательно, математическая модель ударника, моделирующего приборный отсек, должна учитывать:

- наличие пустот;
- нерегулярность структуры;

- физико-механические характеристики материалов, входящих в состав приборного отсека.

Таблица 1

**Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для различных металлов**

Материал	Плотность, кг/см <sup>3</sup>	Скорость звука, м/с	Коэффициенты в линейном законе (б)		$p$
			$a$	$b$	
Алюминий	2.71	-	5250	1.39	20÷2000
Сплав Al 921-Т	-	-	5067	1.428	
Бериллий	1.845	7934	7975	1.091	144÷290
Вольфрам	19.17	4050	4005	1.268	400÷2110
Железо (сталь 0.2% С)	7.85	-	3800÷ 4000	1.58 1.58	400÷5000 1000÷4100
Золото	19.3	3057	3150	1.47	590÷5200
	19.24		3075	1.56	280÷2000
Магний	1.72	-	4780	1.16	60÷400
Медь	8.9	3980	3958	1.497	220÷1470
Молибден	10.2	5192	5157	1.238	260÷1670
Никель	8.86	4630	4646	1.445	240÷1520
Свинец	11.34	2029	2028	1.517	200÷1410
Серебро	10.49	-	3300	1.54	460÷4100

Титан	4.51	4847	4779	1.088	175÷1080
Хром	7.1	5150	5217	1.465	238÷1400
Цинк	7.14	3030	3050	1.559	190÷1430
Эпоксидная смола	-	-	3000	1.375	-

Построить точную математическую модель такого ударника не представляется возможным: во-первых, ввиду трудностей чисто математического характера; во-вторых, отсутствия ясной физической картины процесса прохождения ударной волны через приборный отсек; в-третьих, на этапе проектирования, как правило, неизвестна ни номенклатура входящих материалов, ни компоновка отсека.

В тоже время анализ прототипов дает возможность, с той или иной степенью достоверности, определить такие характеристики приборных отсеков как их габариты, средняя плотность, распределение плотности и массы по объему, приблизительная номенклатура входящих материалов и т.д. Эти данные при введении ряда допущений позволяют построить приближенную математическую модель, дающую правильную качественную картину происходящих при ударе явлений и удовлетворительные количественные оценки.

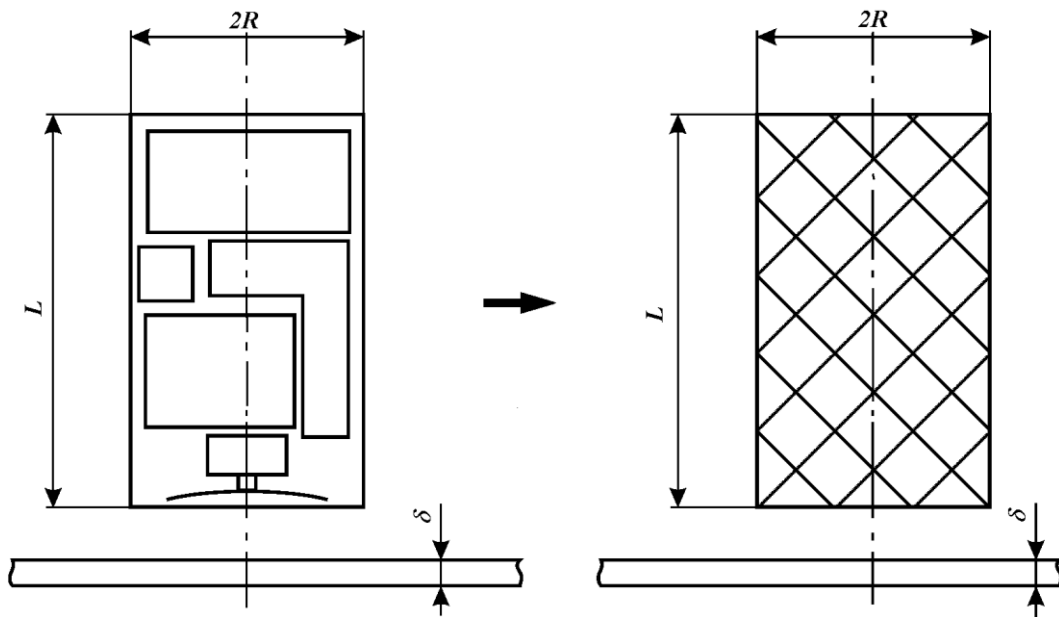


Рис. 1. К замене реального приборного отсека эквивалентным ударником.

Допустим, что реальный приборный отсек можно рассматривать как неоднородный пористый ударник, с регулярной структурой, имеющий такие же размеры, как и реальный отсек, с плотностью равной средней плотности отсека, т.е. ударник, моделирующий приборный отсек, выполнен из композиционного материала типа простая смесь.

Для определения скорости ударной волны в смесевом ударнике воспользуемся математической моделью, суть которой состоит в том, что смесь рассматривается как слоистая структура. Тогда время прохождения ударной волны через слои есть простая сумма времен прохождения каждого из слоев [16]. Следовательно, величина, обратная средней скорости ударной волны, есть взвешенная сумма слагаемых, обратных скоростям в компонентах, т.е.

$$U_{sc} = \frac{1}{\sum_i y_i / U_{si}}, \quad \sum_i y_i = 1, \quad (9)$$



где  $U_{sc}$  – средняя скорость ударной волны в смеси,  $y_i$  – объемные доли компонент,  $U_{si}$  – скорость ударной волны в  $i$  – той компоненте.

При смешении компонент, как показывают экспериментальные данные, проявляется тенденция к снижению скоростей  $U_{si}$ . Однако, слоистая структура позволяет каждому компоненту передавать волну с присущей ему скоростью. Следовательно, полученное выше выражение (9) для скорости ударной волны в слоистом теле служит верхним прогнозируемым пределом  $U_{sc}$ . Наличие пустот в ударнике оценивается коэффициентом пористости  $\beta$ . Под коэффициентом пористости композиционного ударника в дальнейшем будем понимать величину, определяемую равенством

$$\beta = \rho_0 \sum_i \frac{m_i}{\rho_i}, \quad \sum_i m_i = 1, \quad (10)$$

где  $m_i, \rho_i, \rho_0$  – массовая доля и плотность  $i$  – той компоненты, средняя плотность ударника соответственно.

Для учета влияния пористости на скорость распространения ударной волны в смеси  $U_{sc}\beta$  рассмотрим сначала пористый однородный ударник, т.е. ударник, выполненный из одного материала. В работе [1] приведены экспериментальные данные по скорости распространения ударной волны  $U_{s\beta}$  в пористом однородном материале от величины массовой скорости  $U_p$ . Эксперименты проводились для различных ударников с коэффициентами пористости  $\beta = 0.5 \div 1.0$ , выполненных из различных материалов. Результаты экспериментов хорошо согласуются следующей зависимостью

$$U_{s\beta} = \begin{cases} \frac{U_s}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_s}{U_p} (2 - \frac{U_p}{U_p^*})}, & \text{при } U_p^* \geq U_p \\ \frac{U_s}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_s}{U_p}}, & \text{при } U_p < U_p^* \end{cases} \quad (11)$$

где  $U_s$  – скорость распространения ударной волны в ударнике при коэффициенте пористости  $\beta=1$ ;  $U_p^*$  – критическая массовая скорость, учитывающая влияние пористости на скорость распространения ударной волны;  $U_{s\beta}$  – скорость распространения ударной волны в пористом однородном ударнике  $\beta \neq 1$ .

На рисунке 2 приведены графики изменения  $U_{s\beta}$  в функции массовой скорости  $U_p$  для ряда значений  $\beta$ , построенные по формуле (11) (штрих пунктирные линии). Сплошными линиями на рисунке представлены графики, полученные экспериментальным путем [2,7,13,14,15,17]. Как следует из анализа приведенных графиков, значения  $U_{s\beta}$ , вычисленные по формуле (11), отличаются от экспериментальных данных не более чем на 5% в широком диапазоне изменения массовой скорости. Это позволяет сделать предположение, что для пористого композиционного ударника с регулярной структурой скорость распространения ударной волны  $U_{sc\beta}$  можно в первом приближении определить по формуле

$$U_{sc\beta} = \begin{cases} \frac{U_{sc}}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_{sc}}{U_p} (2 - \frac{U_p}{U_{pc}^*})}, & \text{при } U_{pc}^* \geq U_p \\ \frac{U_{sc}}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_{sc}}{U_p}}, & \text{при } U_p \geq U_{pc}^* \end{cases} \quad (12)$$

где  $U_{pc}^* = 1 / \sum_i (y_i / U_{pi}^*)$  – критическая массовая скорость смеси,  $\beta$  – коэффициент пористости смеси.

Таким образом, зная массовые и объемные доли компонент пористого композиционного ударника с регулярной структурой, можно по формуле (7) определить величину контактного давления, развиваемого им при ударе о жесткую преграду

$$p = \rho_0 U_p U_{sc\beta}. \quad (13)$$

В приборные отсеки ЛА входят отдельные агрегаты и блоки аппаратуры, которые, как правило, не связаны между собой непосредственной силовой механической связью. Эти связи осуществляются косвенным путем либо через корпус отсека, либо через силовую раму.

Узлы крепления блоков аппаратуры и агрегатов, сама аппаратура, агрегаты и корпуса отсеков рассчитываются на прочность на основе расчетных случаев нагружения. При этом расчетные перегрузки для этих случаев несравненно меньше перегрузок, возникающих в процессе удара. Поэтому при ударе о преграду происходит срыв блоков аппаратуры и агрегатов с узлов крепления, и они движутся в сторону преграды независимо друг от друга. При встрече с преградой они

разрушаются и передают импульс нагрузки преграде, при этом происходит выброс значительной массы отсека из зоны удара. Оставшаяся в зоне удара масса отсека спрессовывается (т.е. происходит частичное или полное схлопывание пустот), что приводит к резкому уменьшению ее объема [9].

Последовательный выброс материала отсека из зоны удара приводит к уменьшению времени нагружения панели и из-за отсутствия фазы разгрузки ударника позволяет определить время действия нагрузки величиной

$$t_y = \frac{L}{a+bV_s}. \quad (8')$$

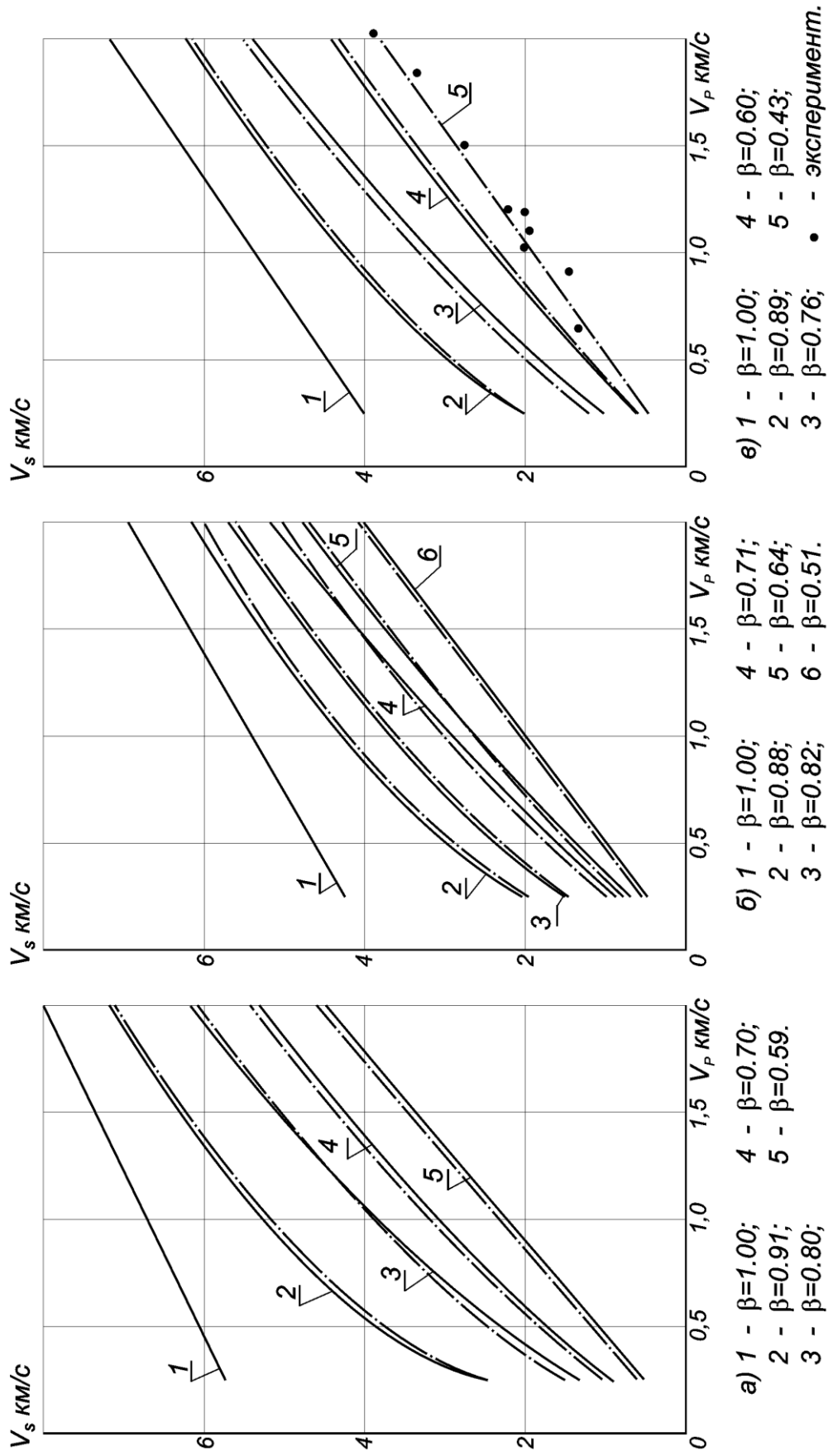


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных (сплошная линия) с теоретическими результатами (штрих-пунктирная линия) для: а) Al2024; б) меди; в) железа.

Так как отсеки ЛА могут иметь сильно изменяющиеся параметры (плотность, массовые доли компонентов, пористость) по длине отсека, то для учета этого изменения отсека можно моделировать составным ударником. Характеристики такого составного ударника будут более полно соответствовать характеристикам приборных отсеков.

В случае жесткого приемника массовая скорость равна скорости удара, т.е.  $U_p = V_0$ , следовательно, зная массовые или объемные доли компонентов, а также коэффициенты  $a_i, b_i$  можно найти величину контактного давления  $p$ . Если же преграда под действием ударной нагрузки деформируется, то  $U_p \neq V_0$ , однако из принятой модели разрушения отсека следует, что  $U_p = V$ , где  $V$  – относительная скорость удара. Следовательно, с учетом всего вышеизложенного можно записать следующую формулу для определения величины контактного давления, развиваемого ударником, моделирующим отсек ЛА

$$p = \alpha(\beta, U_{sc}, U_{pc}^*) \rho_0 V^2, \quad (14)$$

где

$$\alpha(\beta, U_{sc}, U_{pc}^*) = \begin{cases} \frac{U_{sc}/V}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_{sc}}{V} (2 - \frac{V}{U_{pc}^*})}, & \text{при } U_{pc}^* \geq V; \\ \frac{U_{sc}/V}{\sqrt[3]{\beta} + (1 - \sqrt[3]{\beta}) \frac{U_{sc}}{V}}, & \text{при } V \geq U_{pc}^*. \end{cases} \quad (15)$$

Итак, при ударном взаимодействии с преградой реальную конструкцию будем рассматривать (см. рис.1) как пористо-смесевое тело (эквивалентный ударник) с

теми же габаритными размерами, а контактное давление, развиваемое при ударе определять по формуле (14).

Если ввести понятие эффективной скорости удара  $V_{эфф}$ , которое можно определить следующим образом  $V_{эфф} = V \sqrt{\alpha}$ , то контактное давление будет определяться формулой аналогичной формуле (1), т.е.

$$p = \rho_0 V_{эфф}^2,$$

но в отличие от формулы (1) данная формула учитывает физико-механические параметры материалов входящих в конструкцию приборного отсека.

При высокоинтенсивных импульсных нагрузках материал преграды (подкрепленной панели) проявляет в основном пластические свойства, и панели с такими свойствами материала характеризуются качественно иным поведением по сравнению с их упругой стадией работы. Для решения соответствующих задач наибольшее применение находят подходы, основанные на модели жесткопластического тела. Достоинством решений, полученных с применением этой модели, является то обстоятельство, что при всей своей относительной простоте они дают правильное представление о деформировании конструкции в области относительно больших пластических деформаций. Экспериментально обнаружено, что при высоких скоростях динамического нагружения материал пластин имеет тенденцию двигаться в основном в поперечном направлении вне зависимости от направления приложения нагрузки. Это позволяет сделать допущение, что панель под действием высокоинтенсивной нагрузки работает в

основном на сдвиг, следовательно, напряжения, возникающие в панели, будут определяться зависимостью

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}, \quad (16)$$

где  $\tau_0$  - предел текучести материала панели на сдвиг;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости материала панели;  $\dot{\gamma}$  - скорость деформации сдвига [6].

Отметим, что принимая модель вязкопластического течения материала панели, мы ограничиваем область деформации панели, а именно зоной, в которой возможно это течение. В случае нормального удара цилиндрическим ударником границей области течения будет окружность с центром в точке приложения нагрузки.

Выше было отмечено, что процесс ударного взаимодействия тела, моделирующего приборный отсек ЛА, с панелью включает совместное проявление таких явлений как радиальная деформация тела, разлет части материала тела в радиальных направлениях, образования присоединенной массы, нагрева тела и панели, трения, влияния на механические характеристики материала панели скорости деформации  $\dot{\gamma}$  и т.д.

Точное исследование этого процесса практически неосуществимо, поэтому рассмотрим упрощенную модель взаимодействия, основанную на следующих допущениях:

- контактное давление приложено только в области следа ударника;



- контактное давление определяется нормальной составляющей скорости удара;
- панель работает на сдвиг и в ней развивается вязкопластическое течение, которое описывается уравнением (16)
- зона вязкопластического течения ограничена переменными по времени внутренней и внешней границами, на которых выполняется условие равенства касательных напряжений пределу текучести материала на сдвиг [12].

Математическую модель «косого удара» построим на базе математической модели «нормального» удара, которая была изложена выше. Опуская подробный вывод уравнения движения преграды под действием высокоинтенсивной нагрузки, отметим только те моменты, которые имеют первостепенное значение.

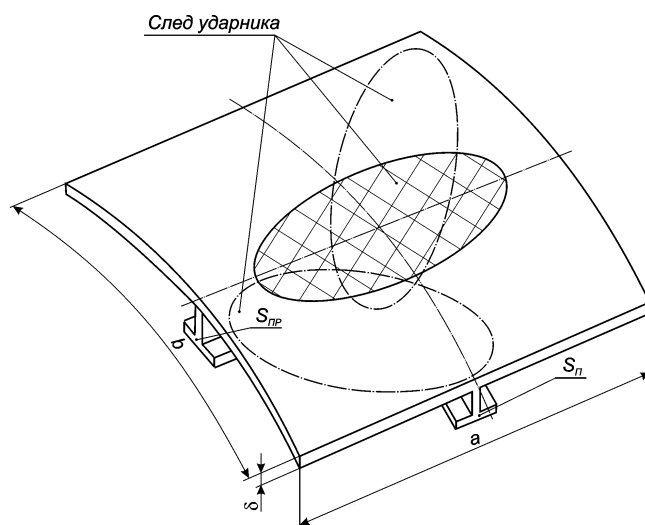


Рис.3. К выбору расчетного случая нагружения панели.

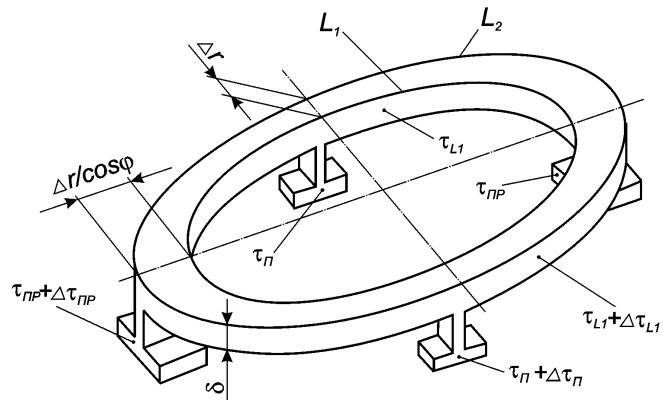


Рис. 4. К выводу уравнения равновесия эллиптического кольца.

Допустим, что при подходе к цели вектор скорости ЛА  $V_0$  совпадает с осью ЛА и составляет угол  $\varphi$  с нормалью к преграде. В качестве расчетного случая нагружения панели будем рассматривать удар в перекрестие подкрепляющих силовых элементов, когда они совпадают с большой и малой осью следа ударника (см. рис.3). При построении математической модели «косого удара» введем следующие допущения:

- при «косом ударе» также как и при «нормальном ударе» в преграде развивается вязкопластическое течение;
- концентрические окружности линий равных скоростей преграды при «нормальном ударе» переходят в эллиптические при «косом ударе», это допущение позволяет свести «косой удар» к «нормальному» путем пересчета некоторых параметров преграды;
- подкрепляющие силовые элементы панели работают также как и обшивка панели на сдвиг, т.е. в них развивается вязкопластическое течение;

- действие цилиндрического ударника с прямыми торцами эквивалентно действию цилиндрического ударника с косыми торцами (параллельными плоскости преграды).

С учетом этих допущений, рассмотрев равновесие эллиптического кольца (см. рис.4), вырезанного из преграды по линиям равных скоростей, получим уравнение движения преграды в цилиндрической системе координат в безразмерном виде

( $\bar{x} = r/R$  – относительный радиус,  $\bar{\xi} = t \frac{\tau_{0\varphi}}{\mu_{\varphi}}$  – безразмерное время):

$$He \left[ 1 + \frac{1}{x} \left( \bar{\rho}_n \bar{S}_n + \frac{\bar{\rho}_{np} \bar{S}_{np}}{\cos \varphi} \right) \right] \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{\xi}} = \left[ 1 + \frac{1}{x} \left( \bar{\mu}_n \bar{S}_n + \bar{\mu}_{np} \bar{S}_{np} \cos \varphi \right) \right] \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{Sen}{x} + k Re'' (1 - \bar{u}^2) [1 - H(\bar{x} - 1)] \quad (17)$$

Краевые условия, которым должно удовлетворять решение  $\bar{u}(\bar{x}, \bar{\xi})$  имеют вид:

- в начальный момент времени  $\bar{\xi} = 0$  преграда неподвижна, т.е.

$$\bar{u}(\bar{x}, \bar{\xi}) = 0 \quad \text{при} \quad \bar{\xi} = 0; \quad (18)$$

- на внешней границе вязкопластического течения  $\bar{x} = \bar{b}(\bar{\xi})$  скорость и производная скорости по радиусу равна нулю, т.е.

$$\bar{u}(\bar{x}, \bar{\xi}) = \frac{\partial \bar{u}(\bar{x}, \bar{\xi})}{\partial \bar{x}} = 0 \quad \text{при} \quad \bar{x} = \bar{b}(\bar{\xi}); \quad (19)$$

- на внутренней границе вязкопластического течения  $\bar{x} = \bar{a}(\bar{\xi})$  производная скорости по радиусу равна нулю, т.е.

$$\frac{\partial \bar{u}(\bar{x}, \bar{\xi})}{\partial \bar{x}} = 0 \quad \text{при} \quad \bar{x} = \bar{a}(\bar{\xi}), \quad (20)$$

а также на внутренней границе зоны вязкопластического течения должно выполняться следующее условие

$$\begin{aligned} He \left[ 1 + \frac{2}{x} (\bar{\rho}_n \bar{S}_n + \frac{\bar{\rho}_{np} \bar{S}_{np}}{\cos \varphi}) \right] \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{\xi}} = \\ = k Re'' (1 - \bar{u}^2) - \frac{2 Sen}{x} \left[ 1 + \frac{1}{x} (\bar{S}_n \bar{\tau}_{0n} + \bar{S}_{np} \bar{\tau}_{0np}) \right] \end{aligned} \quad \text{при} \quad \bar{x} = \bar{a}(\bar{\xi}). \quad (21)$$

Из (21) следует, что вязкопластическое течение развивается в панели в том случае если

$$\psi = \frac{k Re''}{2 Sen [1 + (\bar{S}_n \bar{\tau}_{0n} + \bar{S}_{np} \bar{\tau}_{0np})]} > 1. \quad (22)$$

Это неравенство устанавливает связь между внешней нагрузкой и параметрами панели, при которых возможна принятая модель вязкопластического деформирования панели. Как было отмечено выше, достоинством решений, полученных на основе модели вязкопластической среды, является правильное качественное представление о деформировании конструкции в области относительно больших деформаций. Анализ результатов, полученных для косоугольного удара, показывает, что относительно большие деформации при вязкопластическом течении наступают, если выполняется условие  $\psi \geq 1.15$ .

Опишем физические величины, входящие в формулы (17) – (22).

1. Геометрические параметры панели:  $\delta$  – толщина обшивки панели;  $S_n, S_{np}$  – площади сечения поперечного и продольного силового набора.

2. Физико-механические параметры панели:  $\mu, \mu_n, \mu_{np}$  – коэффициенты динамической вязкости материалов обшивки, поперечного и продольного силового набора панели;  $\rho, \rho_n, \rho_{np}$  – плотности материалов обшивки, поперечного и продольного силового набора панели;  $\tau_0, \tau_{0n}, \tau_{0np}$  – пределы текучести материалов обшивки, поперечного и продольного силового набора панели.

3. Условия соударения;  $V$  – скорость отсека;  $\varphi$  – угол подхода отсека к панели, отсчитываемый от нормали к ее поверхности;  $V_\varphi$  – нормальная составляющая вектора скорости отсека;  $\rho_0$  – средняя плотность отсека;  $R$  – радиус отсека;  $k$  – коэффициент полноты импульса, учитывающий потери энергии на радиальную деформацию отсека, трение, вынос части материала отсека из зоны нагружения,  $0.7 \leq k \leq 0.9$ .

4. Производные параметры:

- $a(\varphi) = \frac{2}{1.5(1 + \cos\varphi) - \sqrt{\cos\varphi}}$  – коэффициент приведенной длины контура следа тела;

- $\bar{S}_n = \frac{S_n}{\pi R \delta}, \bar{S}_{np} = \frac{S_{np}}{\pi R \delta}$  – относительные площади сечений поперечного и продольного силового набора;

- $\mu_\varphi = \frac{\mu}{a^2(\varphi) \cos\varphi}$  – приведенный коэффициент динамической вязкости материала обшивки панели;

- $\rho_\varphi = \frac{\rho}{\cos\varphi}$  – приведенная плотность материала обшивки панели;

- $\tau_{0\varphi} = \frac{\tau_0}{a(\varphi) \cos \varphi}$  – приведенный предел текучести материала обшивки

панели;

- $\bar{\mu}_n = \frac{\mu_n}{\mu_\varphi}, \quad \bar{\mu}_{np} = \frac{\mu_{np}}{\mu_\varphi}$  – относительные коэффициенты динамической

вязкости материалов поперечного и продольного силового набора;

- $\bar{\rho}_n = \frac{\rho_n}{\rho_\varphi}, \quad \bar{\rho}_{np} = \frac{\rho_{np}}{\rho_\varphi}$  – относительные плотности материалов поперечного и

продольного силового набора;

- $\bar{\tau}_{on} = \frac{\tau_{on}}{\tau_{o\varphi}}, \quad \bar{\tau}_{onp} = \frac{\tau_{onp}}{\tau_{o\varphi}}$  – относительные пределы текучести материалов

поперечного и продольного силового набора;

- $H(\bar{x}-1) = \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{x} < 1; \\ 1 & \text{при } \bar{x} \geq 1. \end{cases}$  – функция Хэвисайда;

- $Re = \frac{\rho_\varphi V_\varphi R}{\mu_\varphi}$  – критерий Рейнольдса;

- $Re'' = \frac{R \rho_{0\varphi}}{\delta \rho_\varphi} Re$  – приведенный критерий Рейнольдса;

- $Sen = \frac{R \tau_{0\varphi}}{V_\varphi \mu_\varphi}$  – критерий Сен-Венана;

- $He = \frac{\rho_\varphi R^2 \tau_{0\varphi}}{\mu_\varphi^2}$  – критерий Хедстрема.

Ниже приведены результаты расчета ударного взаимодействия приборного отсека с преградой (панелью) для следующих исходных данных:

- параметры преграды:  $\delta = 2\text{см}$ ,  $S_{np} = 20\text{см}^2$ ,  $S_n = 15\text{см}^2$ ,  $\tau_0 = 0,4\text{ГПа}$ ;  
 $\tau_{0n} = 0,4\text{ГПа}$        $\tau_{0np} = 0,4\text{ГПа}$        $\mu = 0,4 \cdot 10^4 \text{ Н с / м}^2$ ;       $\mu_n = 0,4 \cdot 10^4 \text{ Н с / м}^2$ ,  
 $\mu_{np} = 0,4 \cdot 10^4 \text{ Н с / м}^2$ ,  $\rho = \rho_n = \rho_{np} = 8000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  
 приборный отсек:  $\rho_0 = 750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $R = 25\text{см}$ ,  $k = 0,8$ .

При расчете принималось, что разрушение панели происходит в сечении, в котором деформации сдвига  $\gamma$  достигают предельного значения, а именно  $\gamma_{пред} = \pi/4$ .

На рис. 5-6 приведены графики изменения максимальных касательных напряжений  $\tau/\tau_0$  и температуры панели  $T/T_0$  ( $T_0$  – начальная температура панели в градусах Кельвина) в точке  $\bar{x} = 1$  в момент разрушения панели  $\bar{\xi} = \bar{\xi}^*$  от скорости удара  $V$ .

На рис. 7-8 приведены графики изменения границ зоны вязкопластического течения (внешней  $\bar{b}(\bar{\xi}^*)$  и внутренней  $\bar{a}(\bar{\xi}^*)$ ) от скорости удара в момент разрушения панели для случаев нормального (рис.7) и косо́го удара ( $\varphi = 60^\circ$ ).

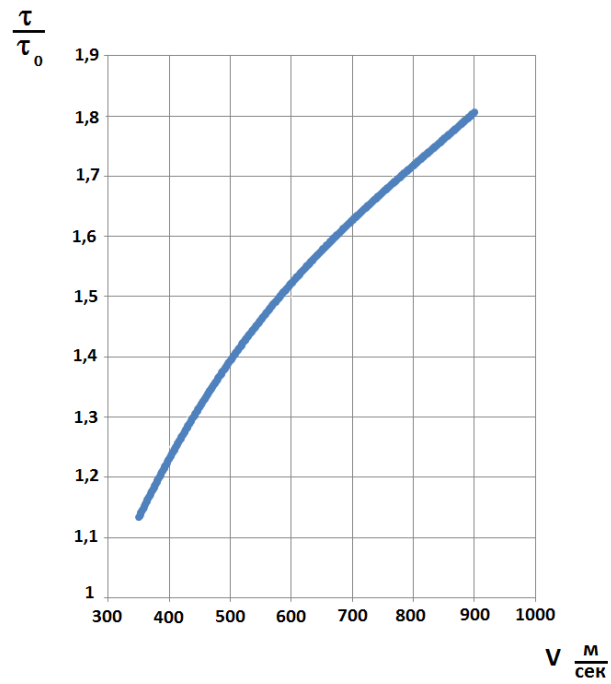


Рис.5. Изменение максимальных касательных напряжений в зависимости от скорости удара.

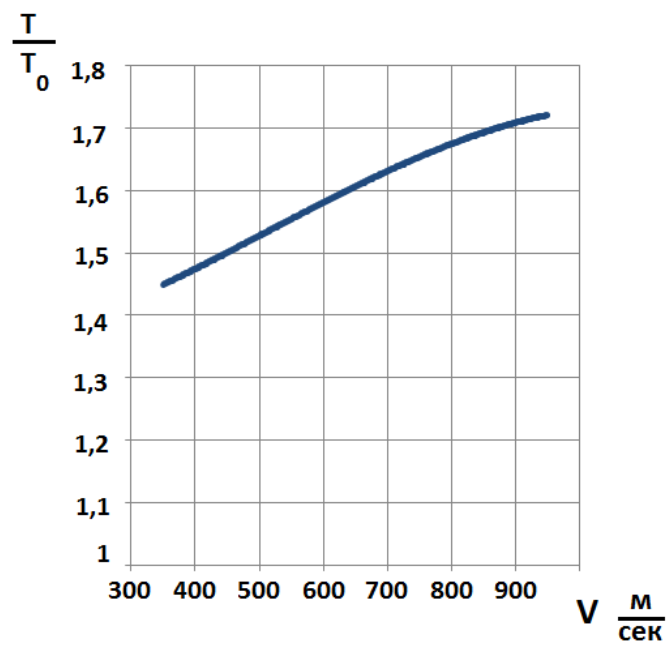


Рис.6. Изменение температуры в зависимости от скорости удара



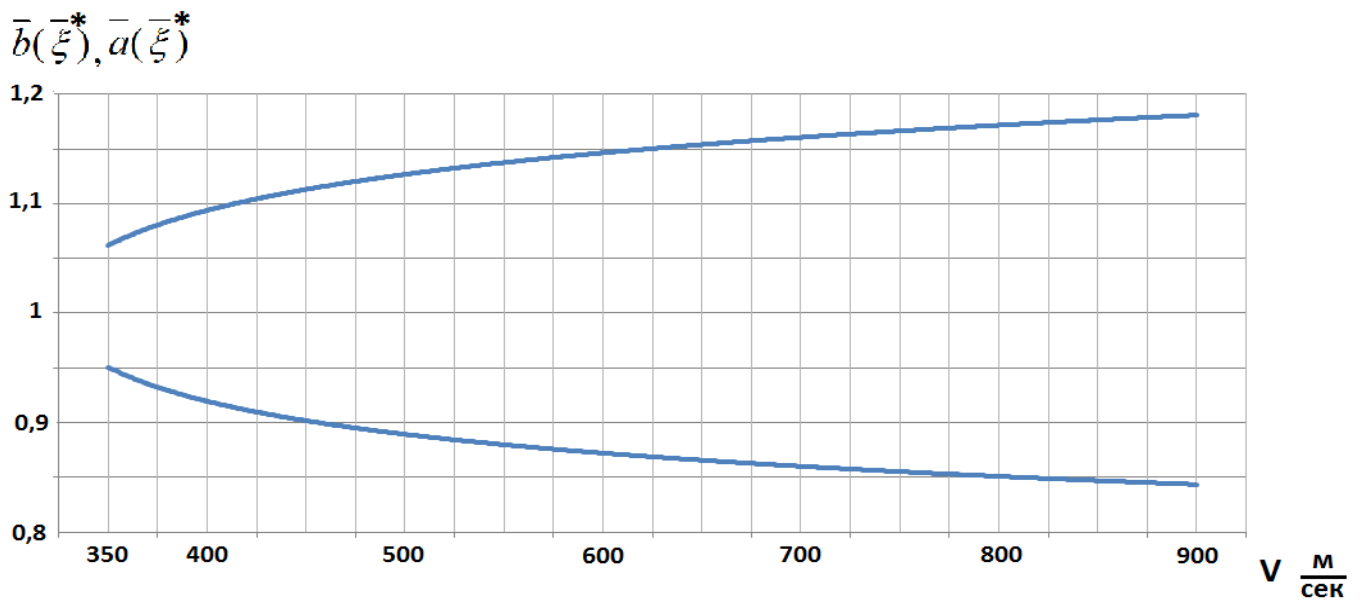


Рис. 7. Изменение внутренней и внешней границ зоны вязкопластического течения от скорости для случая встречи под прямым углом

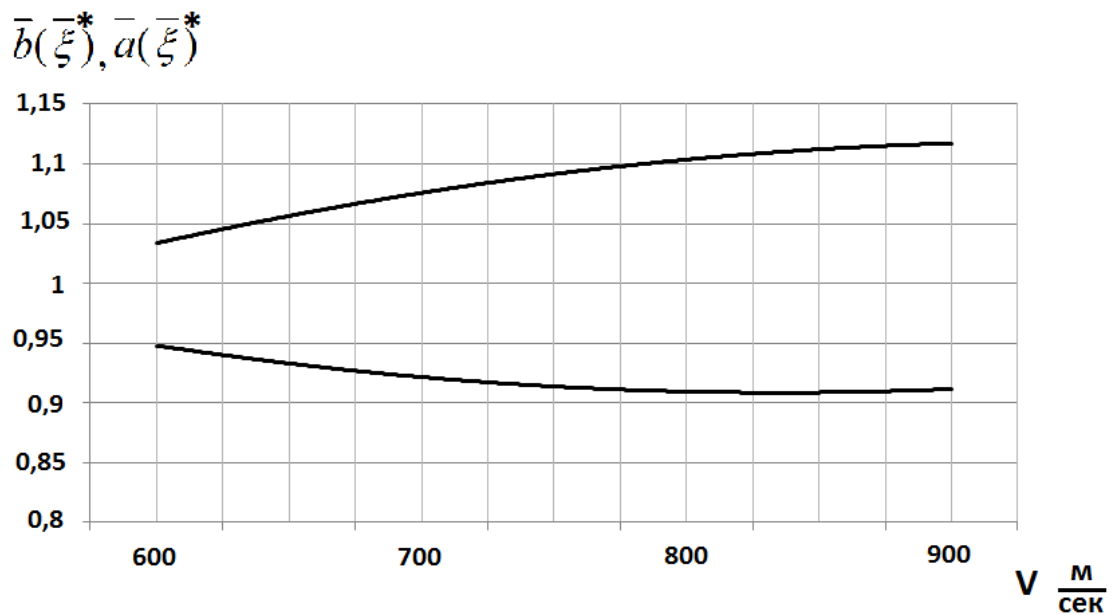


Рис. 8. Изменение внутренней и внешней границ зоны вязкопластического течения от скорости для случая встречи под углом  $60^\circ$

## Заключение

Результаты расчета по приведенной методике для пластических ударников, хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями [20]. Для “пористо-смесевых” ударников, которыми моделируются аппаратурные отсеки ЛА, отметим, что в рассмотренном диапазоне скоростей встречи с преградами:

- зона интенсивного вязкопластического течения локализована в узкой области около контура следа ударника;
- разрушение панели происходит при напряжениях значительно превышающих предел текучести материала панели;
- влияние роста температуры на физико-механические характеристики материала панели в первом приближении можно не учитывать.

## Библиографический список

1. Кинслоу Р. Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973. - 533 с.
2. Бахишян Ф.А. К вязкопластическому течению при ударе цилиндра по пластинке // Прикладная математика и механика. 1948. Т. XII. № I. С. 47 - 52.
3. Рахматуллин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. – М.: Физматгиз, 1961. - 400 с.
4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М.: Наука, 1970. Т. – 492 с., Т. - II. 586 с.

5. Клягин В.А., Петров И.А., Шкурин М.В. Анализ размещения блоков бортового радиоэлектронного оборудования на самолетах различных типов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=84442>
6. Alves M, Micheli G. B., Driemeier L. High-velocity impact of plates // Mechanics of Solids in Brazil, 2007, pp. 51 - 61. ISBN 978-85-85769-30-7
7. Ali Taherkhani, Mojtaba Sadighi, Ali Sadough Vanini, and Mohsen Zarei Mahmoudabadi. An experimental study of high-velocity impact on elastic-plastic crushable polyurethane foams // Aerospace Science And Technology, 2016, vol. 50, pp. 245 – 255.
8. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // International Journal of Plasticity, 2008, vol. 24, no.10, pp. 1642 - 1693.
9. Петушков В.А. Вязкопластическое течение и локализация деформаций в повреждаемой среде при ударных воздействиях // Сибирский федеральный университет. 2009. Т. 2. № 3. С. 336 – 351.
10. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. - 296 с.
11. Хабибулин М.В. Математическое моделирование явлений, происходящих в твердых телах в результате высокоскоростного удара и взрыва. Дисс. доктора физ мат. наук, Томск, 2003. -264 с.
12. Grubenab G., Solvernesad S., Berstadab T., Morinab D., Hopperstadab S., Langsethab M. Low-velocity impact behaviour and failure of stiffened steel plates // Marine Structures, 2017, vol. 54, pp. 73 - 91.

13. Cheng-Hsiung Huang, Chuen-Jinn Tsai, Tung-Sheng Shih, Particle collection efficiency of an inertial impactor with porous metal substrates // *Journal of Aerosol Science*, 2001, vol. 32, no. 9, pp. 1035 – 1044.
14. Фёдоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В., Гладков Н.А., Ладов С.В. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2016. № 5 (68). С. 18 – 32.
15. Афанасьева Ф.А. Белов Н.Н., Козорезов К.И., Хабибулин М.В., Югов Н.Т. Высокоскоростное проникание пористых ударников в преграды конечной толщины // *Доклады Академии наук*. 1997. Т. 42. № 7. С. 381 - 384.
16. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. - М.: Наука, 1978. - 336 с.
17. Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379 - 1382.
18. Aris Phillips, Han-Chin Wu. A Theory of viscoplasticity // *International Journal of Solids and Structures*, 1973, vol. 9, issue 1, pp. 15 – 30.
19. Falk M.L., Langer J.S. Dynamics of viscoplastic deformation in amorphous solids // *Physical review*, 1998, vol. 57, no. 6, pp. 7192 – 7205.
20. Rice J. *Constitutive Equations in Plasticity*, Cambridge, MIT Press, 1975, 23 p.