

На правах рукописи

Лю Хао

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИ-  
ОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ**

Специальность 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидат технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель:

**Думанский Александр Митрофанович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

**Дудченко Александр Александрович**

доктор технических наук, профессор кафедры проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий МАИ (Национальный исследовательский университет).

**Федулов Борис Никитович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории пластичности механика математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Ведущая организация:

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет).

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.08 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005 г. Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, аудитория 407 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.08.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.08,  
к.т.н., доцент



А.Ю. Луценко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Накопление в околоземном пространстве элементов отработавших ракет-носителей и космических аппаратов (КА) является неизбежным негативным результатом космической деятельности. Сочетание техногенного космического мусора с естественными метеороидами создает среду, представляющую реальную опасность для КА. Наблюдения за состоянием околоземного космического пространства показывают, что с течением времени количество техногенных фрагментов увеличивается с прогрессирующей скоростью, и опасность столкновения их с орбитальными КА возрастает. В настоящее время в космосе находится почти 128 млн фрагментов космического мусора размером более 1 мм и 34 тыс. фрагментов размером более 10 см. Все, что меньше 1 мм, подсчитать крайне трудно. Скорость частиц может достигать до 11 км/с в зависимости от орбиты, что делает актуальной проблему обеспечения ударной прочности конструкций орбитальных КА.

В последние годы возникла проблема обеспечения безопасности КА от космического мусора, которая была решена введением в их конструкцию защитных экранов. Экспериментальное исследование ударного воздействия мелких частиц космического мусора представляет трудоемкую и дорогостоящую задачу. В связи с вышесказанным важное значение приобретает разработка методов расчета прочности элементов силовой конструкции защиты КА при динамическом и высокоскоростном воздействии. Несмотря на то, что уже проведен большой объем исследований в области сопротивления элементов силовых конструкций защиты КА ударным нагрузкам, остается много нерешенных вопросов.

Анализ литературных данных показывает, что к настоящему времени не создана методика, которая в полной мере позволяет учитывать влияние скорости и массы космического мусора на прочность элементов несущих конструкций баллистической защиты КА и сформулировать конкретные рекомендации по выбору безопасной геометрии конструктивно-силовой схемы.

Настоящая работа посвящена разработке методов прогнозирования механического поведения элементов каркаса защиты КА из композиционных материалов (КМ). Изучение закономерностей механического поведения углепластика при высокоскоростном ударе представляется актуальной задачей. При моделировании удара космического мусора на элементы каркаса защиты КА необходимо построение определяющих соотношений и методов расчета прочности при динамическом и высокоскоростном воздействии, позволяющих учитывать физическую нелинейность с учетом температуры.

**Целью диссертационной работы** является обеспечение безопасности КА путем определения толщины несущей конструкции из композиционных материалов при ударном нагружении с учетом физической нелинейности.

### **Основные задачи работы.**

1. Разработка методики построения определяющих соотношений однонаправленного углепластика, нагруженного под разными углами к направлению армирования при переменных во времени нагрузках.

2. Разработка методов расчета прочности опытных образцов из углепластика, используемых в каркасе конструкции защиты КА, с учетом влияния скорости деформирования и температуры.

3. Обработка экспериментальных данных по определению физико-механических характеристик углепластика Т300/АG80, используемого в каркасе конструкции защиты КА.

4. Конечно-элементное моделирование сопротивления деформированию и разрушению при высокоскоростном ударе алюминиевыми частицами и расчет геометрии элементов силового каркаса конструкции защиты КА.

**Объект исследования** – композитная несущая конструкция трансформируемой ловушки для защиты КА от космического мусора.

**Предмет исследования** – прочность КМ и методы обеспечения безопасности КА при высокоскоростном ударе.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы модели механики сплошной среды, включающие элементы наследственной механики твердых тел, соотношение анизотропной теории упругости, феноменологические подходы к оценке прочности при высокоскоростных воздействиях, методы обработки и анализа экспериментальных данных, сочетание численных и экспериментальных методов исследования физико-механических характеристик КМ. Испытания проводились на испытательных машинах Инстрон 5500R и разрезном стержне Гопкинсона. Конечно-элементное моделирование было выполнено с использованием программы ANSYS Autodyn.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработана новая методика построения определяющих соотношений наследственного типа, позволяющих описывать анизотропию механических свойств однонаправленного углепластика при скоростном нагружении.

2. Впервые предложены критерии разрушения однонаправленного углепластика в зависимости от скорости деформирования с учетом влияния температуры.

3. Разработана новая методика определения геометрии силовой конструкции в зависимости от массы и скорости космического мусора для обеспечения безопасности КА.

#### **Практическая значимость диссертационной работы.**

1. Разработанные методы построения определяющих соотношений и модели оценки прочности и нагрева КМ позволяют сократить число экспериментов по отработке режимов испытаний и повысить точность прогнозирования сопротивления деформированию и разрушению крупногабаритных конструкций.

2. Показано, что в качестве материала каркаса защиты КА может быть использован однонаправленный углепластик, который удовлетворяет необходимым требованиям по прочности, в том числе углепластик Т300/АG80 может быть использован для создания элемента силовой конструкции защиты КА.

3. Результаты проведенных исследований являются научно-методической основой расчетно-экспериментальной отработки прочности каркаса защиты КА при ударе компактной алюминиевой частицей массой 0,1 - 1 г в диапазоне скоростей 7,0 - 11,0 км/с.

4. Определены безопасные толщины каркаса баллистической защиты КА в зависимости от массы и скорости ударника.

**Достоверность и обоснованность** научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе, подтверждается корректным применением математических методов и математическим обоснованием полученных в работе аналитических решений, а также сопоставлением расчетных значений с экспериментальными, полученными как в рамках настоящей работы, так и в работах других авторов.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Методы построения определяющих соотношений для однонаправленного углепластика при переменных во времени нагрузках с учетом физической нелинейности.

2. Критерии разрушения однонаправленного углепластика с учетом влияния скорости деформирования и температуры.

3. Комплекс программ испытаний прочности при квазистатическом, статическом и динамическом нагружении.

4. Конечно-элементное моделирование воздействия алюминиевых частиц на элементы образцов из однонаправленного углепластика и определение геометрии силового каркаса защиты КА, обеспечивающего безопасность КА.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: II Международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технология» г. Москва, 20-21 ноября 2019 г.; VI Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», г. Москва, 26 -27 ноября 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019», г. Севастополь, 09-13 сентября 2019 г.; Международная молодежная научно-техническая конференция «Космические технологии», г. Реутов, 28 Мая 2019 г.; XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания», г. Москва, 01 февраля 2019 г.; Международная научная конференция «XLIII академические чтения по космонавтике», г. Москва, 29 января -01 февраля 2019 г.; I международный форум по композитам «Ключевые тренды в композитах: наука и технология», г. Москва, 5-8 декабря 2018 г.; III международная конференция «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (DFCMS-2018), г. Москва, 23-25 октября 2018 г.; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», г. Казань, 8-10 августа 2018 г.; IV международная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение», г. Москва, 4–6 декабря 2018 г.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 16 научных работах, в том числе в 2 статьях в журналах перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, в 8 публикациях, индексируемых в базе данных Scopus, и 6 сборниках тезисов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 168 наименований. Работа содержит 87 рисунков, 25 таблиц, изложена на 167 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, научные результаты, обоснованы их достоверность и практическая значимость, приводятся сведения об апробации работы, краткое описание содержания диссертации по главам.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения безопасности летательных аппаратов в космосе при высокоскоростном воздействии, вызванном столкновениями с космическим мусором. Обоснованы технические требования, предъявляемые к элементу конструкции каркаса защиты КА из углепластика. Приведен обзор и рассмотрены вопросы экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств КМ при квазистатическом, статическом и динамическом нагружениях. Приведен анализ закономерностей механического поведения углепластиков при высокоскоростном воздействии с учетом влияния температуры.

**Во второй главе** рассмотрены основные механические характеристики, определяемые при квазистатическом и динамическом испытаниях КМ (Рис. 1), с помощью которых разработана методика построения определяющих соотношений однонаправленного углепластика.

Анизотропия упругости однонаправленного материала может быть описана известным соотношением следующего вида:

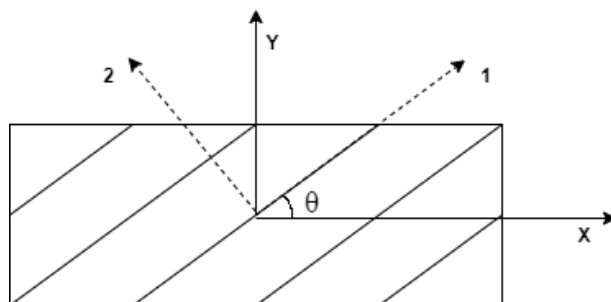


Рис. 1.

$$\frac{1}{E_{\theta}} = \frac{c^4}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) c^2 s^2 + \frac{s^4}{E_2} \quad (1)$$

где  $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$  - характеристики упругости слоя,  $c = \cos \theta$ ,  $s = \sin \theta$ .

Модуль упругости в направлении армирования не зависит от времени, а в направлении, перпендикулярном армированию, и при внутрислойном сдвиге соответствующие модули могут быть представлены в операторной форме и с использованием принципа соответствия Вольтерра  $\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E^0} (1 + K^*)$  выражение (1) принимает вид:

$$\frac{1}{E_{\theta}^*} = \frac{c^4}{E_1} + \left( \frac{1 + K_{12}^*}{G_{12}^0} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) c^2 s^2 + \frac{s^4}{E_2^0} (1 + K_2^*), \quad (2)$$

где  $K^* \cdot f = \int_0^t K(t - \tau) f(\tau) d\tau$  - наследственный оператор. В качестве ядра наследственного оператора выберем слабосингулярное ядро Абеля:  $K(t) = \frac{k}{\Gamma(1+\alpha)} t^{\alpha}$ , где параметры сингулярности  $-1 < \alpha < 0$ . На основе анализа опытных

данных углепластиков параметр сингулярности ядра принимается равным -0,9. Выражение (2) делится на две части, первая описывает мгновенную составляющую  $\frac{1}{E_\theta^0} = \frac{c^4}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}^0} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right) c^2 s^2 + \frac{s^4}{E_2^0}$ , а вторая - временную часть:  $\frac{1}{G_{12}^0} c^2 s^2 K_{12}^* + \frac{1}{E_2^0} s^4 K_2^*$ , тогда запишем выражение для операторного модуля упругости:  $\frac{1}{E_\theta^0} = \frac{1}{E_\theta^0} + \lambda_\theta I_\alpha^*$ , где  $\lambda_\theta = \frac{k_{12} c^2 s^2}{G_{12}^0} + \frac{k_2 s^4}{E_2^0}$ . Определяющее соотношение представлено следующим образом:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E_\theta^0} (1 + k_\theta I_\alpha^*) \sigma_\theta, \quad (3)$$

где  $k_\theta = \lambda_\theta E_\theta^0$ . Обращение выполнено с помощью резольвенты оператора Абеля,

$$\sigma_\theta = E_\theta^0 (1 - k_\theta \mathfrak{D}_\alpha^* (-k_\theta)) \varepsilon_\theta, \quad (4)$$

где  $\mathfrak{D}_\alpha^* (-k_\theta) \cdot 1 = t^{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-k_\theta t^{1+\alpha})^n}{\Gamma[1+(1+\alpha)(1+n)]}$  - дробно-экспоненциальная функция

Работнова с ядром, равным  $\mathfrak{D}_\alpha(-\beta, t) = t^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta t^{1+\alpha})^n}{\Gamma[(1+\alpha)(1+n)]}$ .

Определяющее соотношение при скоростном деформировании, задаваемом функцию  $\varepsilon(t) = \dot{\varepsilon} t$ , можно получить из (3) в следующем виде:

$$\sigma_\theta = E_\theta^0 \left[ 1 - k_\theta \left( \frac{\varepsilon_\theta}{\dot{\varepsilon}} \right)^{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left( -k_\theta \left( \frac{\varepsilon_\theta}{\dot{\varepsilon}} \right)^{1+\alpha} \right)^n}{\Gamma[2 + (1+\alpha)(1+n)]} \right] \varepsilon_\theta \quad (5)$$

Параметры определяющего соотношения (5) определялись по результатам испытаний под углом 90° и 45° однонаправленных углепластиков IM7/8552 и AS4/3501-6. С помощью опытных данных были получены данные, Таблица 1.

Таблица 1

Параметры определяющего соотношения

	$E_2^0$ , ГПа	$E_{45}^0$ , ГПа	$G_{12}^0$ , ГПа	$k_2$ , с <sup>-(1+α)</sup>	$k_{12}$ с <sup>-(1+α)</sup>
IM7/8552	10,4	17,22	5,8	0,1280	0,1327
AS4/3501-6	15,5	23,33	10,1	0,2018	0,3051

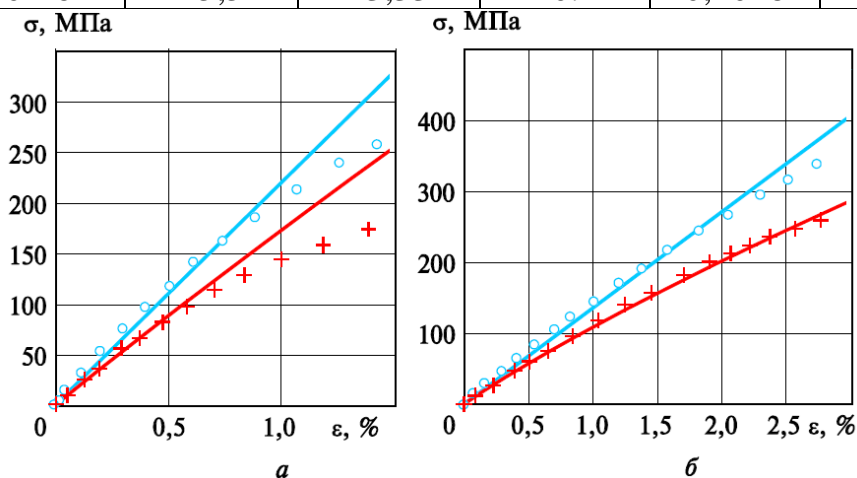


Рис. 2. Кривые деформирования образцов из углепластика AS4/3501-6 при сжатии под углами  $\theta=45^\circ$  (а) и  $90^\circ$  (б) к направлению армирования

— ○ - динамическое нагружение, — + - квазистатическое нагружение

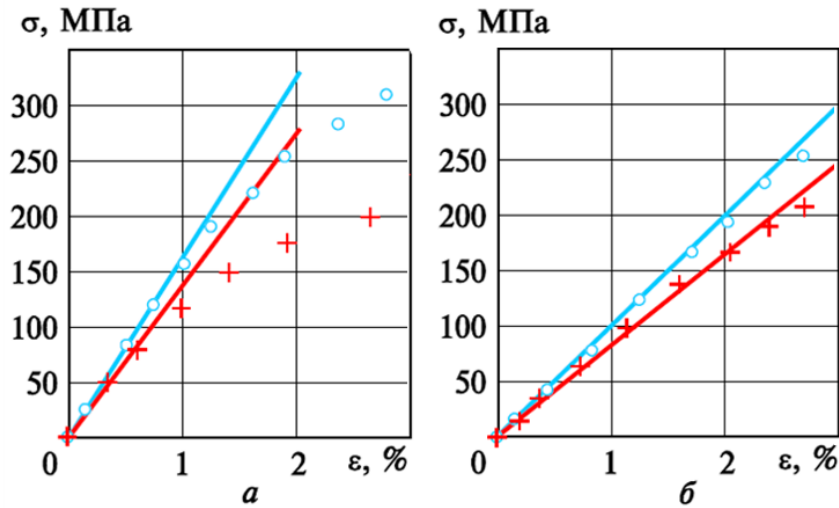


Рис. 3. Кривые деформирования образцов из углепластика IM7/8552 при сжатии под углами  $\theta=45^\circ$  (а) и  $90^\circ$  (б) к направлению армирования

—  $\circ$  - динамическое нагружение, —  $+$  - квазистатическое нагружение

Для описания нелинейного деформирования при сдвиге в плоскости слоя использовалось нелинейное уравнение Работнова  $\varphi(\gamma_{12}) = (1 + k_{12}I_\alpha^*)\tau_{12}$ , из которого следует  $\tau_{12} = (1 - k_{12}I_\alpha^*(-k_{12}))\varphi(\gamma_{12})$ , где  $\varphi(\gamma_{12})$  - кривая мгновенного деформирования. Кусочно-линейную аппроксимацию кривой мгновенного деформирования представим в виде  $\varphi(\gamma_{12}) = G_{12}^0\gamma_{12}H(\gamma_{12}) - \sum_{i=1}^p \Delta G_i^0 H(\gamma_{12} - \gamma_i^*)$ . Тогда,

$$\tau_{12} = G_{12}^0\psi(\gamma, \dot{\gamma})\gamma - \sum_{i=1}^r \Delta G_{12}^i\psi(\gamma - \gamma_i^*, \dot{\gamma})(\gamma - \gamma_i^*)H(\gamma - \gamma_i^*), \quad (6)$$

$$\text{где } \psi(\gamma, \dot{\gamma}) = \left[ 1 - k_{12} \left( \frac{\gamma}{\dot{\gamma}} \right)^{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left( -k_{12} \left( \frac{\gamma}{\dot{\gamma}} \right)^{1+\alpha} \right)^n}{\Gamma[2+(1+\alpha)n]} \right].$$

где  $\gamma_i^*$  - значения деформации сдвига, при которых наблюдается уменьшение модуля сдвига  $\Delta G_i^0$ ,  $H(\cdot)$  - функция Хевисайда. Получены коэффициенты  $G_{12}^0 = 6,3$  ГПа,  $\gamma_i^* = 2,4,6$ ;  $\Delta G_i^0 = 4, 0,8$  и  $1$  ГПа. Сравнение расчетных кривых деформирования и экспериментальных данных при квазистатическом и динамическом нагружениях показано на Рис. 4.

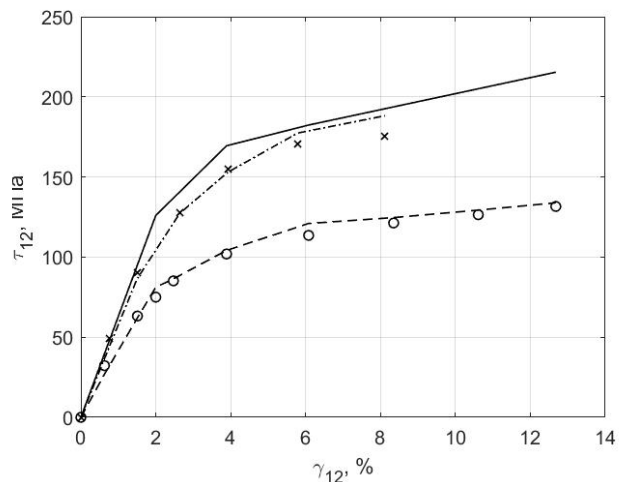


Рис. 4. Кривые деформирования при сдвиге в плоскости слоя при  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-4}, 300 \text{ сек}^{-1}$ . Сплошная – мгновенная кривая.



В третьей главе разработаны методики расчета прочности однонаправленного углепластика при одноосном нагружении с учетом скорости деформирования и влияния температуры.

Для описания кривой прочности предложена параболическая зависимость -  $\tau_{12} = a \cdot \sigma_2^2 + b \cdot \sigma_2 + c$ , где  $\sigma_2$  - напряжение в направлении, перпендикулярном армированию,  $\tau_6$  - касательное напряжение,  $a, b, c$  - коэффициенты, полученные с помощью экспериментальных данных, приведены в Таблице 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных дано на Рис. 5.

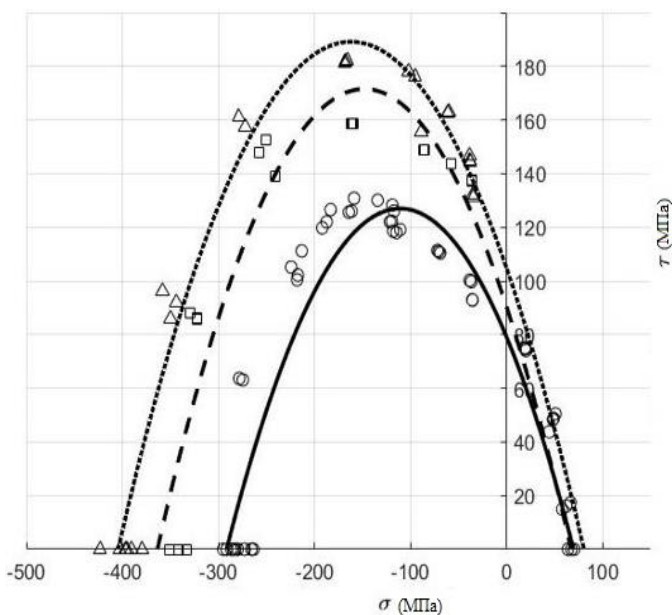


Рис. 5.

Таблица 2

Значения коэффициентов модели					
$\dot{\epsilon} (s^{-1})$	$lg \dot{\epsilon}$	$a$	$b$	$c$	$*R^2$
$10^{-4}$	-4	-0.0039	-0.84	83.7	0.8884
1	0	-0.0034	-0.9	99.1	0.9218
400	2.6	-0.0031	-0.97	110	0.968

Предполагалось, что коэффициенты парабол пропорциональны логарифму нормированной скорости деформации:  $f(\dot{\epsilon}) = \eta(\delta \cdot lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + 1)$ , где  $\eta, \delta$  - коэффициенты аппроксимации. Выражения для разных скоростей получены в виде:  $a(\dot{\epsilon}) = a_0 \left( -0,03 \cdot lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + 1 \right)$ ,  $b(\dot{\epsilon}) = b_0 \left( 0,02 \cdot lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + 1 \right)$ ,  $c(\dot{\epsilon}) = c_0 \left( 0,047 \cdot lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + 1 \right)$ , где  $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ,  $a_0 = -0,0039$ ,  $b_0 = -0,84$ ,  $c_0 = 83,7$ , (Рис. 6).

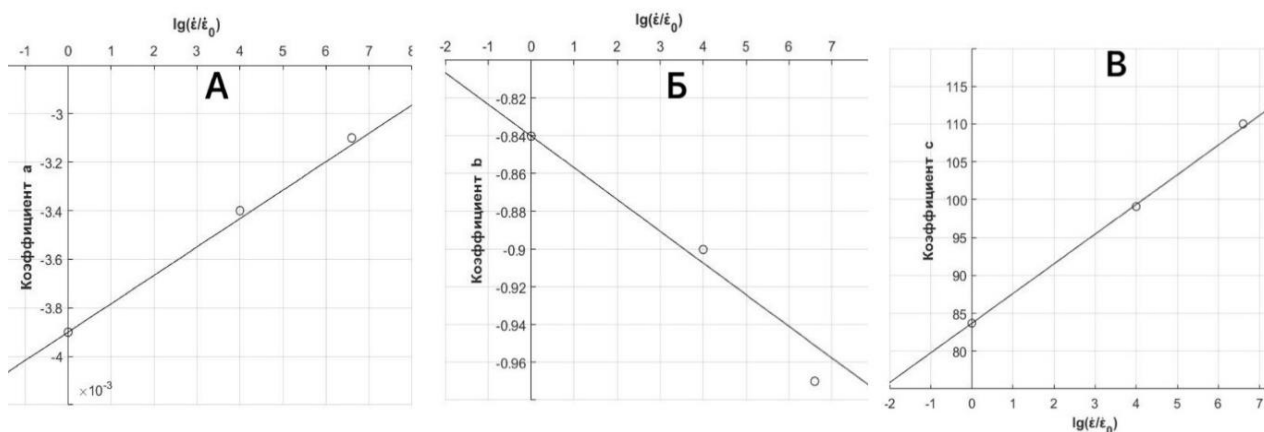


Рис. 6. Соотношения коэффициентов от скорости деформирования.  
А-коэффициент  $a$ , Б-коэффициент  $b$ , В-коэффициент  $c$

Представим кривую прочности однонаправленного углепластика в виде следующего уравнения,

$$\frac{(\sigma_2 - \lambda)^2}{m^2} + \frac{\tau_6^2}{n^2} [1 + k(\sigma_2 - \lambda)] = 1, \quad (7)$$

где  $m = \frac{\sigma_2^+ - \sigma_2^-}{2}$ ;  $\lambda = \frac{\sigma_2^+ + \sigma_2^-}{2}$ ,  $\sigma_2^+$ ,  $\sigma_2^-$  - значения прочности при растяжении и сжатии в направлении, перпендикулярном армированию.

Напряжение  $\sigma_x$  действует под углом  $\theta$  к направлению армирования, тогда нормальное напряжение  $\sigma_2 = \sigma_x \sin^2(\theta + \gamma)$  и касательное напряжение  $\tau_6 = -\sigma_x \sin(\theta + \gamma) \cos(\theta + \gamma)$ , где  $\gamma$  - значение изменения угла к направлению армирования при внутрислойном сдвиге. При  $\theta + \gamma = \pi/4$  касательное напряжение имеет максимальное значение  $\tau_6^0$ . Дифференцируя неявную функцию (7) по  $\tau_6$ , получены выражения коэффициентов  $k = \frac{-2(\sigma_0 - \lambda)}{m^2 + (\sigma_0 - \lambda)^2}$  и  $n = \frac{|\sigma_0 \cdot m|}{\sqrt{m^2 + (\sigma_0 - \lambda)^2}}$ .

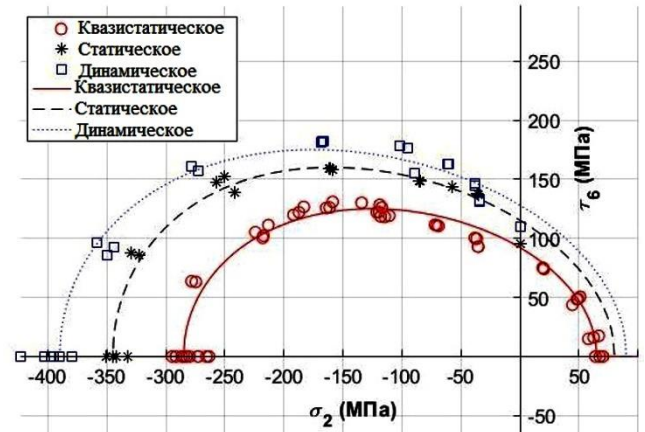


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

На основе экспериментальных данных из Таблицы 3 получены числовые значения параметров критерия (7). Расчетные кривые прочности однонаправленного углепластика при разных скоростях деформирования, приведены на Рис. 7.

Таблица 3

Значения коэффициентов  $m$ ,  $n$ ,  $\lambda$ ,  $k$

Нагружение	$\lg \dot{\varepsilon}$	$m$ , МПа	$n$ , МПа	$\lambda$ , МПа	$k$ , МПа <sup>-1</sup>
квазистатическое	-4	175	124,5	110	9,72e-4
статическое	0	212,5	158,7	132,5	1,2e-3
динамическое	2,6	240	174,1	150	8,59e-4

Предполагалось, что параметры критерия линейно зависят от логарифма нормированной скорости деформирования. Полученные выражения имеют вид:

$$m(\dot{\varepsilon}) = m_0(0,055 \cdot \lg \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + 1),$$

$$n(\dot{\varepsilon}) = n_0(0,065 \cdot \lg \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + 1),$$

$$\lambda(\dot{\varepsilon}) = \lambda_0(0,053 \cdot \lg \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} + 1), \text{ где}$$

$\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $m_0 = 175 \text{ МПа}$ ,  $n_0 = 124,5 \text{ МПа}$ ,  $\lambda_0 = 110 \text{ МПа}$ . На Рис. 8 показано сравнение расчетных и экспериментальных результатов.

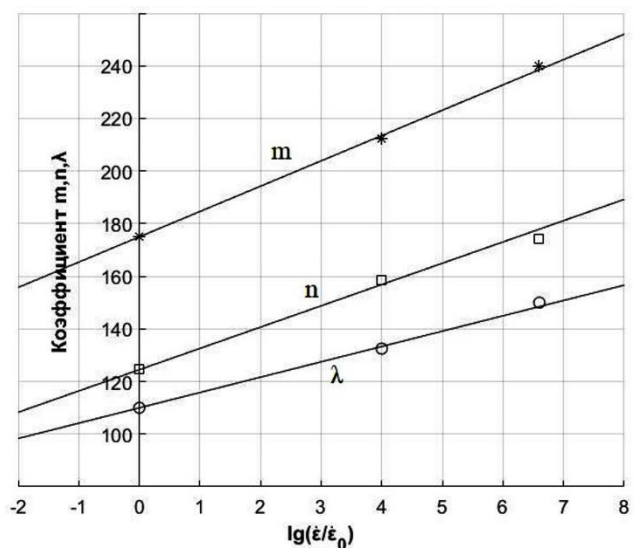


Рис. 8.

Таблица 4

Значения коэффициента детерминации для кривых прочности

Нагрузка	$\dot{\epsilon}$ (с <sup>-1</sup> )	$R^2$	$R^2$ (Daniel NU)
квазистатическое	$10^{-4}$	0,864	0.8383
статическое	1	0,914	0.9003
динамическое	400	0,957	0.9512

Приведено сравнение погрешностей кривых прочности, полученных по разным методам расчета. Коэффициенты детерминации показаны в Таблице 4. Кривые прочности и опытные данные показаны на Рис. 9.

По результатам испытаний образцов на прочность при растяжении-сжатии и сдвиге при разных скоростях деформирования можно построить кривые прочности.

Предложено соотношение оценки влияния температуры на прочность при нагружении под разными углами к направлению армирования однонаправленного углепластика T800/2500:  $\sigma(T)/\sigma(T_0) = p \cdot T/T_0 + q$ , где  $T_0=20^\circ\text{C}$ ,  $p$  и  $q$  – искомые коэффициенты. Полученное выражение имеет вид:  $\sigma(T)/\sigma(T_0) = -0,14 \cdot T/T_0 + 1,2$ . Сравнение расчета и эксперимента показано Рис. 10.

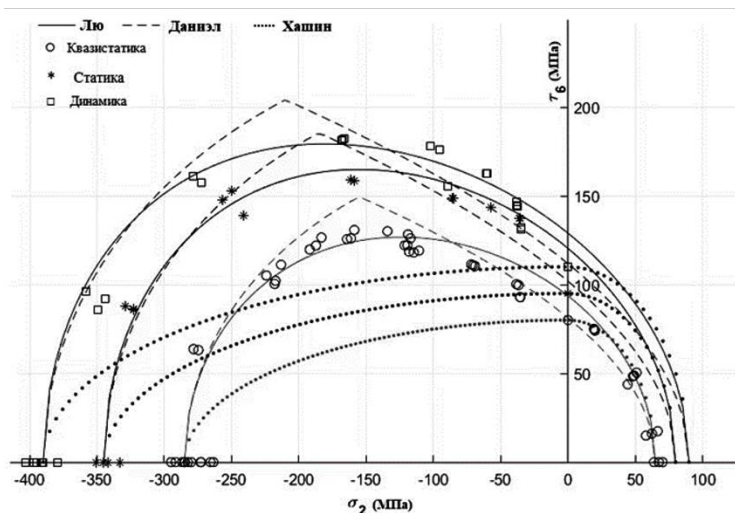


Рис. 9.

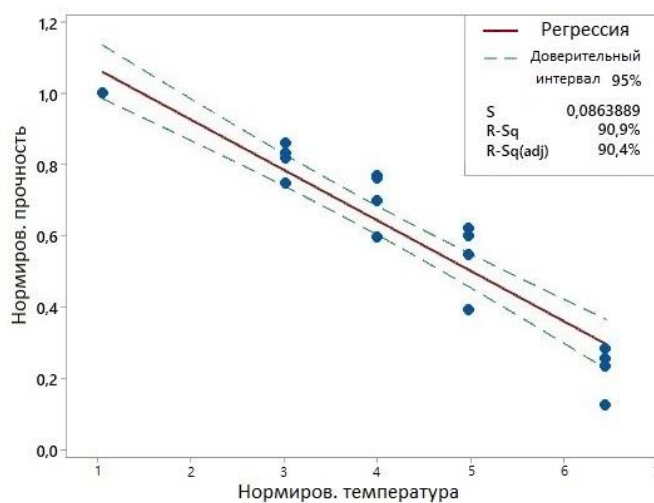


Рис. 10.

В четвертой главе проведён анализ экспериментальных данных и изучены закономерности механического поведения углепластика T300/AG80.

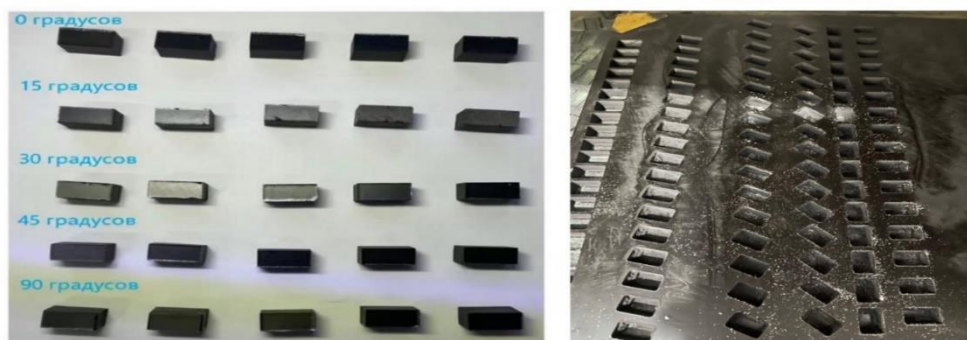


Рис. 11. Образцы для испытания из углепластика T300/AG80

Из пластины из углепластика Т300/AG80, имеющей 47 слоев и общую толщину 10 мм, были вырезаны образцы размером 10\*10мм\*5мм под углами 0°, 15°, 30°, 45° и 90° к направлению основы, Рис. 11. Испытания проводились на испытательных машинах, показанных на Рис. 12: *а* - Инстрон 5500R и *б* - разрезной стержень Гопкинсона, регистрация деформаций образцов выполнялась при помощи динамических тензодатчиков LK2107В *в* и *г* цифрового осциллографа TBS2000. Испытания проводились в Харбинском Техническом Университете. По пять образцов каждой вырезки нагружали тремя значениями скорости деформации. Результаты экспериментов показаны на Рис. 13.



Рис. 12. Испытательные машины

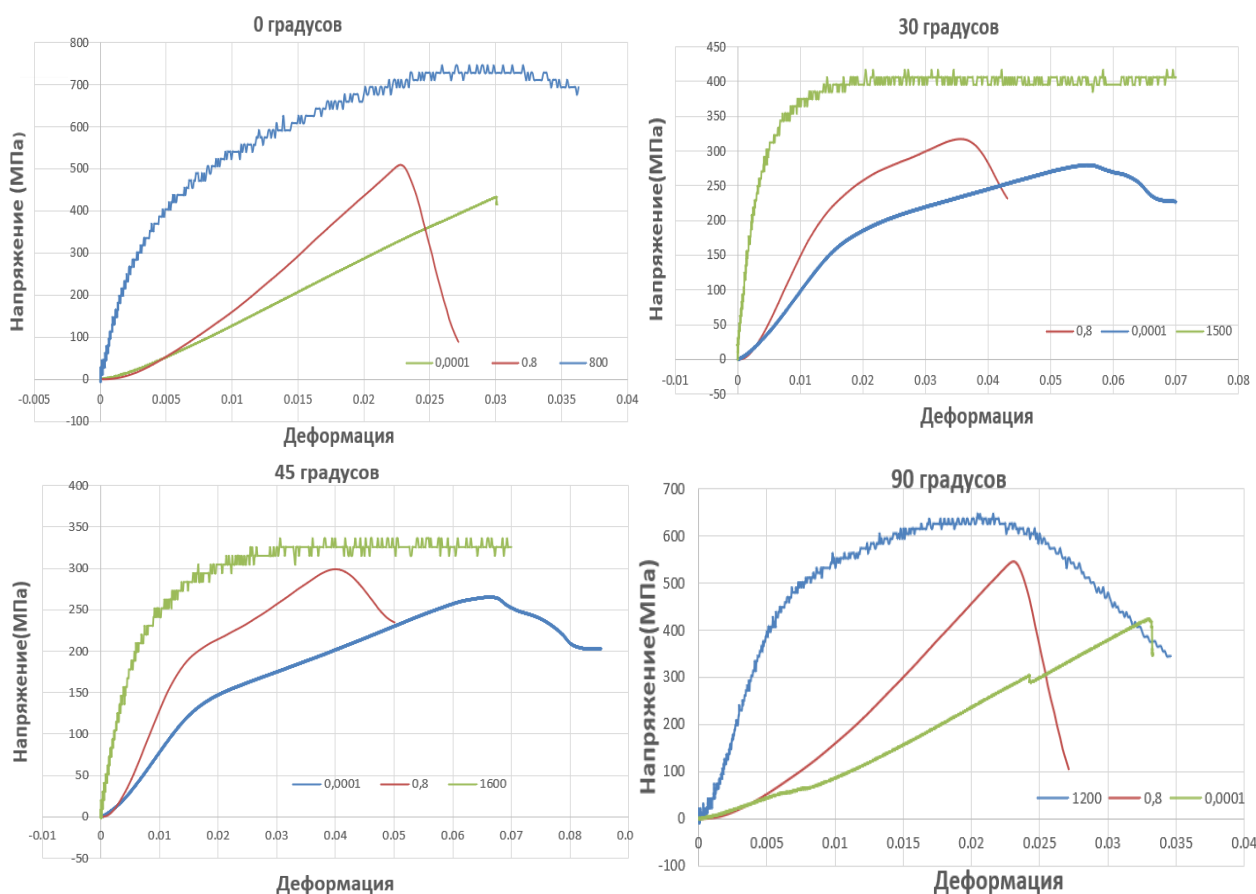


Рис. 13. Экспериментальные кривые напряжения и деформации

Средние значения прочности и предельной деформации представлены в Таблице 5. При углах 30° и 45° образцы из углепластика Т300/AG80 имеют минимальную прочность как при квазистатическом, так и при динамическом нагружении. Экспериментально установлено, что при квазистатическом и статическом нагружении в направлении армирования диаграммы деформирования



близки к линейным, а при динамическом - нелинейным. С ростом скорости деформирования наблюдается увеличение модули и прочности.

Таблица 5

Средние значения прочности и предельной деформации

Скорость деформации(1/с)	Деформация (%)   Прочность (МПа)									
	0°		15°		30°		45°		90°	
$10^{-4}$	3	433	3	311,1	5,8	268	6,6	265,4	3,4	406
0,8	2,3	509,4	2,2	366,8	3,6	312,5	4	303	2,3	546
$10^3$	3	728,1	1,2	653,4	2,3	398,5	5	343,4	2	636

В пятой главе выполнены моделирование высокоскоростного воздействия и расчет геометрии каркаса конструкции защиты КА с помощью метода SPH из блока Autodyn программы ANSYS. Постановка задачи заключается в себя законы сохранения массы, импульса и энергии.

Геометрическая модель (пластина) для решения задачи математического моделирования высокоскоростного удара частицы представляет собой пластину однонаправленного углепластика T300/AG80 с меняющейся длиной и толщиной в процессе моделирования в зависимости от скорости и массы ударника. Модели ударника, двигающиеся со скоростями от 7 до 11 км/с и имеющие массы от 0,1 до 1 г, представляются частицами алюминия кубической формы. Модель исследуемого углепластика принималась линейно-упругой. Алюминий моделировался как вязкопластичный материал. Физико-механические свойства материалов показаны на Рис. 14.

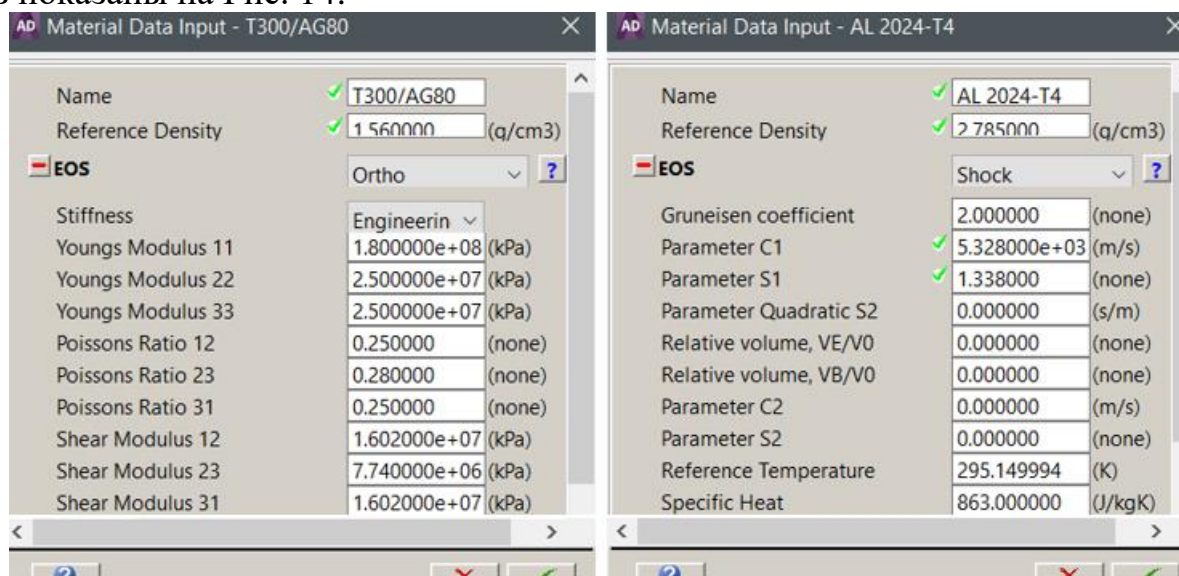


Рис. 14. Параметры пластины и ударника в процессе моделирования высокоскоростного удара методом SPH в Autodyn

Для определения предельной скорости деформирования при скоростях выше 7 км/с проводилось моделирование ударов ударника (Рис. 15,а) в центр пластины (10мм\*10мм\*5мм) в направлении основы со скоростями 7, 8, 9,10, 11 км/с, и соответствующие графики скоростей деформирования от времени действия удара показаны на Рис. 15,б.

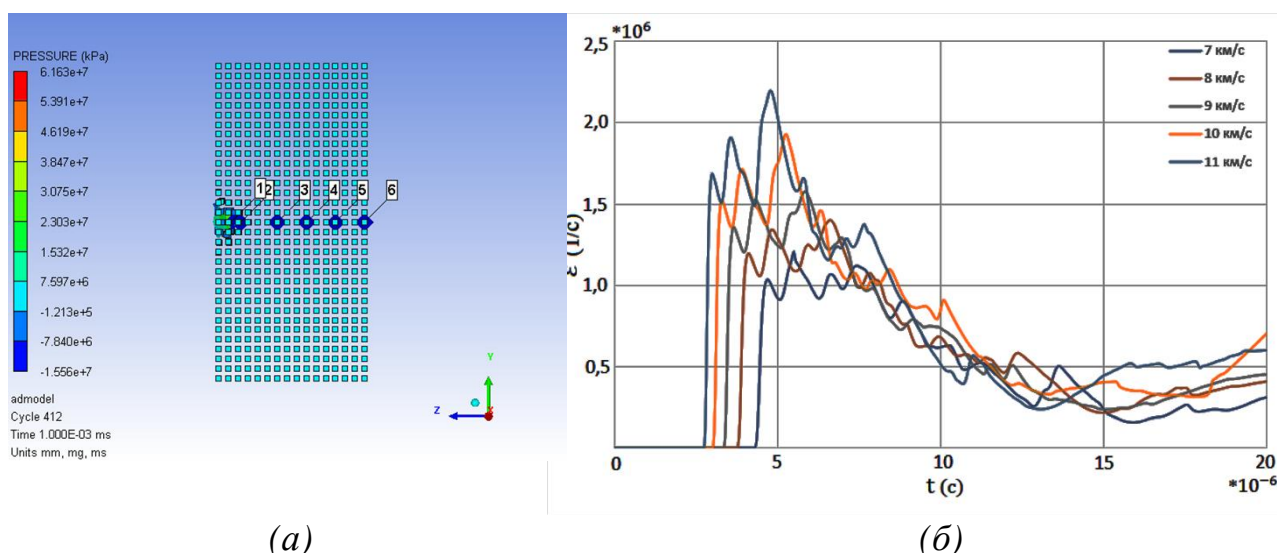


Рис. 15. *а* – схема расположения контрольных точек по толщине пластины. *б* – зависимость скоростей деформирования точки на поверхности пластины от времени при разных значениях ударного воздействия

В Таблице 6 приведен пересчет скоростей деформирования и соответствующие скорости нагружения (удара).

Таблица 6

Расчетные значения скорости деформирования и соответствующие скорости нагружения (удара)

$v$ (м/с)	$10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-3}$	7	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
$\dot{\epsilon}$ (1/с)	$10^{-4}$	0,8	1200	$1,2 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^7$

Результаты испытаний показывают, что однонаправленный углепластик Т300/AG80 под углом  $0^\circ$  к направлению армирования имеет наибольшую прочность при различных скоростях деформирования, но из-за технических трудностей изготовления толстостенных однонаправленных пластин из однонаправленного углепластика и значительных расслоений при высокоскоростном ударе не рекомендуется использование однонаправленного углепластика Т300/AG80 под углом  $0^\circ$  к направлению армирования для проектирования конструкций защиты КА. По анализу экспериментальных результатов однонаправленный углепластик Т300/AG80 под углом  $90^\circ$  к направлению армирования также имеет высокую прочность как при квазистатическом, так и при динамическом нагружении. По этой причине при моделировании были выбраны образцы однонаправленного углепластика Т300/AG80 под углом  $90^\circ$  к направлению армирования, имеющие шириной и длиной 50 мм с изменяющейся толщиной в зависимости от скорости и массы ударника. Удар происходит в центре пластины в направлении противоположном оси Z.

Результаты моделирования при скоростях ударника 7 км/с и 11 км/с с массами 0,1 г, 0,5 г и 1 г показаны на Рис. 16 и 17, соответственно.



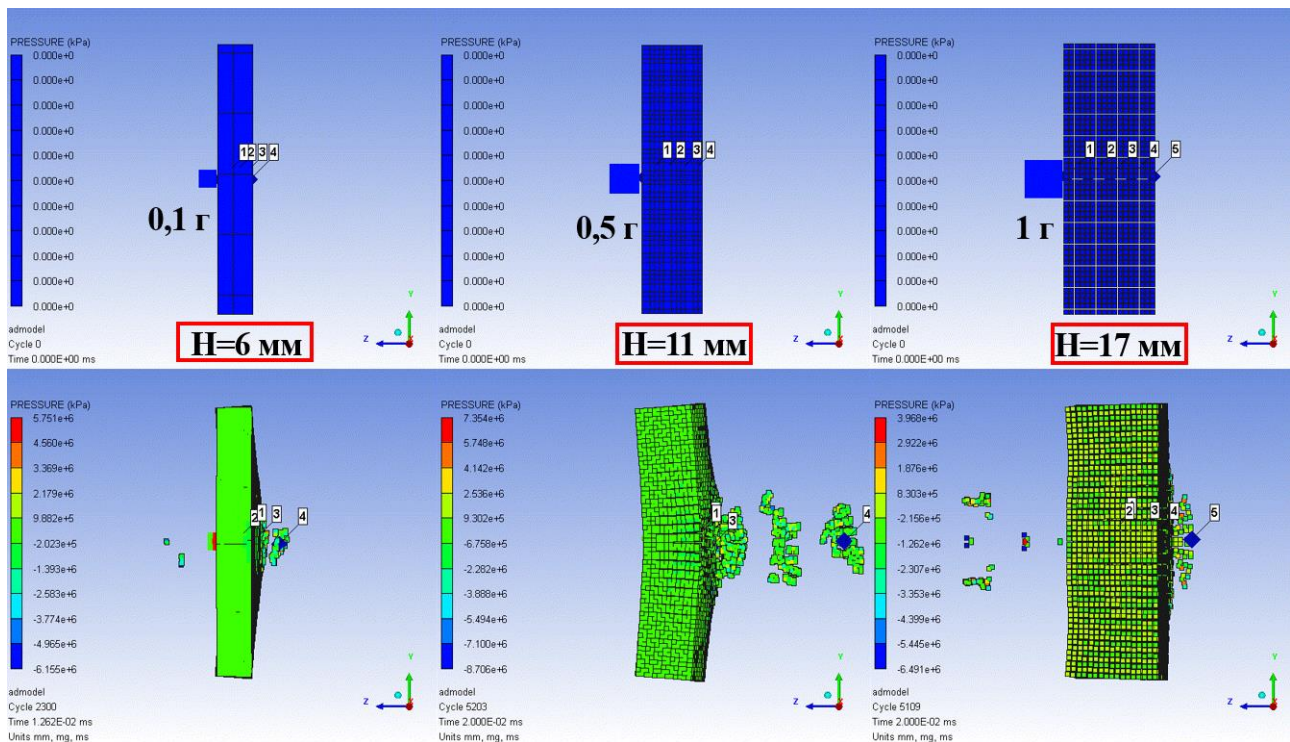


Рис. 16. Определение толщин элементов каркаса при скорости удара 7 км/с и массой 0,1 г, 0,5г и 1 г.

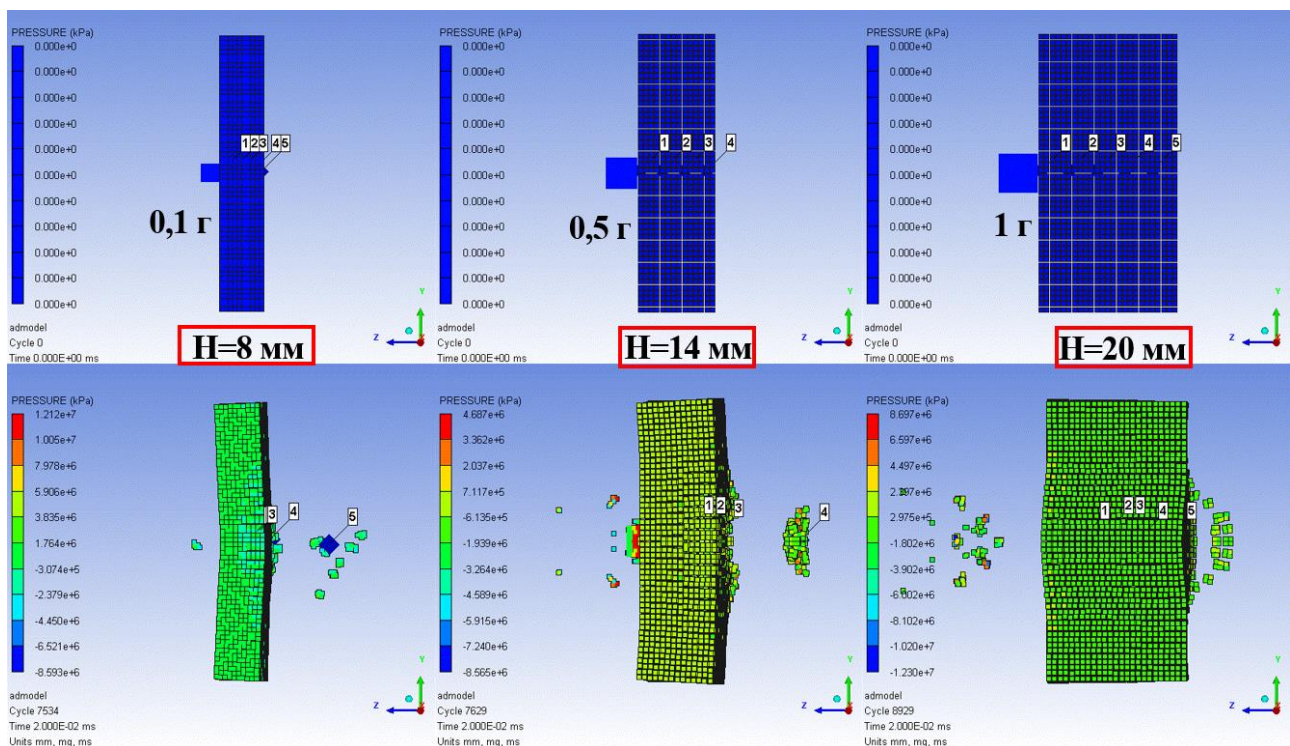


Рис. 17. Определение толщин элементов каркаса при скорости удара 11 км/с и массой 0,1 г, 0,5г и 1 г.

Чтобы найти значения толщин элементов каркаса надо определить границу раздела «пробитие-непробитие» в пластине. На Рис. 18 показаны зависимости скоростей вылетевших частиц (точек) от времени в процессе удара. Считается, что, если значения скоростей вылетевших частиц (точек 4 или 5 в Рис. 16 и 17) ниже нуля, тогда в пластине было пробитие. Таким образом, через множество смоделированных экспериментов с изменением массы ударника, были

определены толщины элементов каркаса конструкции защиты КА. Полученные значения толщины являются минимальными значениями толщин безопасности силовой конструкции защиты КА, изготовленных из однонаправленного углепластика Т300/AG80 под углом  $90^\circ$  к направлению армирования.

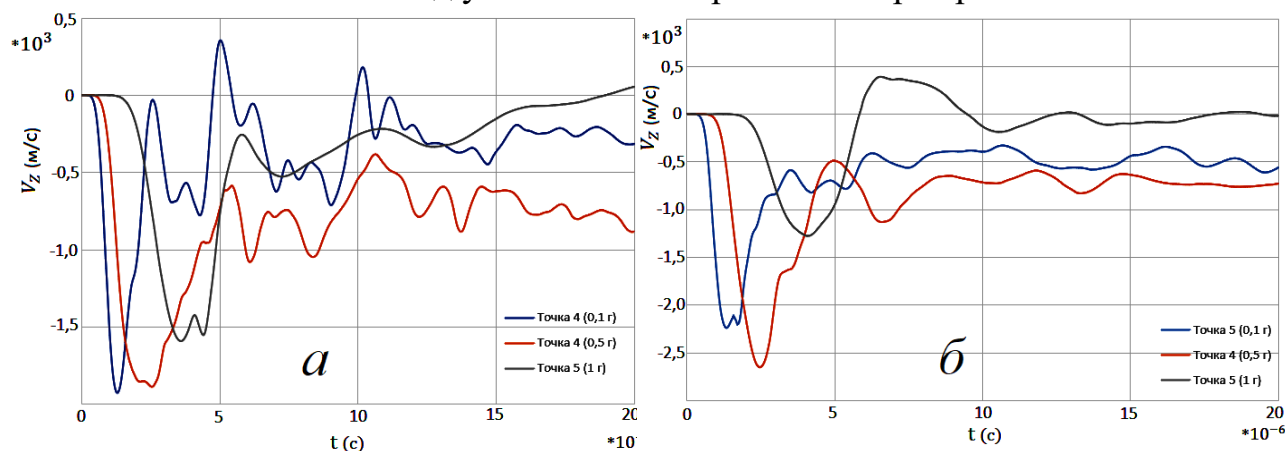


Рис. 18. Зависимости скоростей вылетевших частиц (точек) от времени: *а* - при скорости удара 7 км/с; *б* - при скорости удара 11 км/с

Космический мусор, долгосрочно летающий в космическом пространстве, имеет скорости от 7,9 км/с до 11,2 км/с, которые являются наиболее опасными скоростями космического мусора для КА. В моделирования были определены значения толщин безопасности элементов силовой конструкции защиты КА при скоростях 7 км/с и 11 км/с. На основе результатов моделирования построены графики взаимосвязи толщины безопасности от массы и скорости космического мусора, показанные на Рис. 19. С помощью их взаимосвязи можно определить значения толщины безопасности при скорости космического мусора от 7 км/с до 11 км/с и массой от 0,1 г до 1 г.

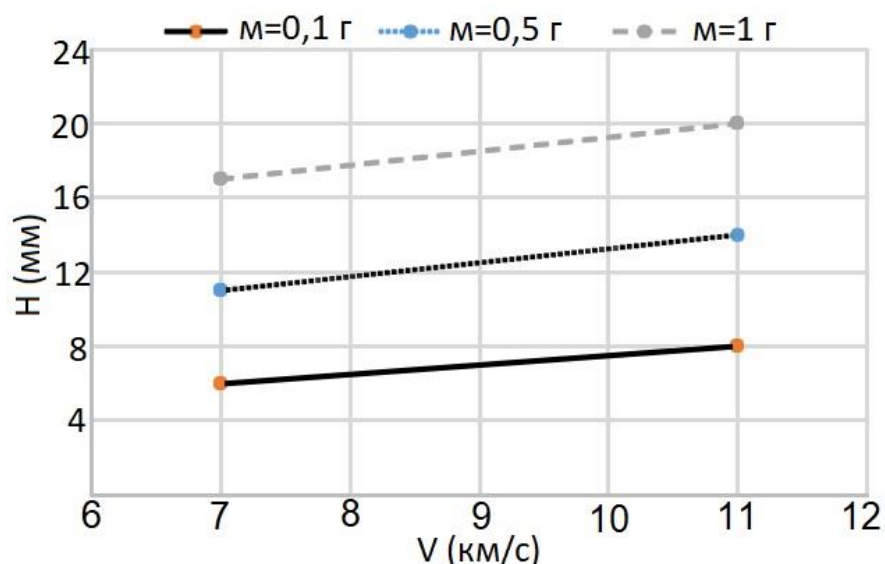


Рис. 19. Взаимосвязь толщины элементов силовой конструкции КА от массы ( $m$ ) и скорости ( $V$ ) космического мусора

**В заключении** сформулированы основные полученные в работе научные результаты и выводы.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе нелинейного наследственного уравнения Работнова с использованием алгебры резольвентных операторов разработана методика построения определяющих соотношений, позволяющая описывать анизотропию механических свойств однонаправленного углепластика при переменных во времени нагрузках и, в частности, при скоростном деформировании.

2. Разработана методика оценки анизотропии прочности при нагружении образцов однонаправленного углепластика, позволяющая учитывать влияние скорости деформирования и температуры.

3. На основе комплексных экспериментальных исследований выявлены фундаментальные закономерности механического поведения образцов из однонаправленного углепластика Т300/AG80. Показано, что с ростом скорости деформирования наблюдается повышение прочности при сжатии во всех исследованных направлениях.

4. С помощью конечно-элементного моделирования получены зависимости скорости деформирования образцов из углепластика от массы и скорости алюминиевого ударника.

5. Выполнены расчеты безопасных толщин несущего каркаса баллистической защиты КА при высокоскоростном воздействии с учетом массы ударника.

6. Разработанные методики могут быть использованы при проектировании элементов защиты КА от воздействия космического мусора. Показано, что углепластик Т300/AG80 удовлетворяет требованиям, предъявленным к материалам защиты КА от космического мусора.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Думанский А.М., Алимов М.А., Лю Х., Закономерности нелинейного поведения однонаправленного углепластика при скоростном деформировании // Композиты и наноструктуры. 2019. Т. 11. № 1 (41). С.16-22. (0,44 п.л./0,2 п.л.).

2. Лю Х., Думанский А.М. Прогнозирование и расчет анизотропии механических свойств однонаправленного углепластика при скоростном нагружении // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 1(97). (0,625 п.л./0,4 п.л.).

3. Думанский А.М., Лю Х., Алимов М.А. Анализ нелинейного деформирования однонаправленного углепластика при квазистатическом нагружении // Материалы 11-й Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания». 2019. С.143-152. (0,625 п.л./0,3 п.л.).

4. Думанский А.М., Лю Х. Анизотропия временных и физически нелинейных свойств однонаправленного углепластика // Сборник тезисов 2-й Международного форума «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии». 2019. С. 236-242. (0,44 п.л./0,2 п.л.).

5. Думанский А.М., Алимов М.А., Лю Х. Нелинейное деформирование однонаправленного углепластика при внутрислойном сдвиге // Сборник научных

трудов 4-й Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, «Живучесть и конструкционное материаловедение». 2018. С. 102-104. (0,188 п.л./0,1 п.л.).

6. Лю Х., Думанский А.М. Исследование влияния скорости деформирования на механическое поведение однонаправленного углепластика // Сборник тезисов международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения». 2018. С. 104. (0,06 п.л./0,04 п.л.).

7. Лю Х., Думанский А.М. Деформирование однонаправленного углепластика при нагружении под углом к направлению армирования // Труды 3-й международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». 2018. С. 182-184. (0,188 п.л./0,1 п.л.).

8. Лю Х. Методика построения определяющего соотношения наследственного типа для однонаправленного углепластика // Материалы 11-й Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания». 2019. С. 372-383. (0,75 п.л./0,75 п.л.).

9. Dumansky A.M., Liu H. Deformation regularities of carbon fiber reinforced plastic under time variable loading // Journal of Physics: Conf. Ser. 2019. Vol. 1158. No. 022038. 7 p. (0,44 п.л./0,2 п.л.).

10. Dumansky A.M., Liu H., Alimov M.A. Strain-rate effect on mechanical behavior of unidirectional carbon fiber reinforced plastic // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. PP. 2377-2381. (0,313 п.л./0,1 п.л.).

11. A.M. Dumansky, Alimov M.A., Liu H. Anisotropy of Nonlinear Behavior of Unidirectional CFRP under Strain Rate Loading // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. No. 030003. (0,44 п.л./0,1 п.л.).

12. Liu H., Dumansky A.M., Alimov M.A. Development of a nonlinear defining relation of the hereditary type for the shear description of unidirectional carbon fiber reinforced plastic IM7-8552 // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. No. 030009. (0,313 п.л./0,2 п.л.).

13. Dumansky A.M., Liu H. Analysis of anisotropy of time-dependent and nonlinear properties of unidirectional CFRP // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 683. No. 012093. (0,44 п.л./0,2 п.л.).

14. Design of composite members with curvilinear fiber trajectories / A.N. Polilov, N.A. Tatus, X. Tian, H. Liu // Journal of Physics: Conf. Ser. 2019 V. 1347. No. 012045. (0,44 п.л./0,1 п.л.).

15. Dumansky A.M., Liu H., Alimov M.A. Strength criterion for unidirectional CFRP under off-axis loading // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 329. No. 03048. (0,375 п.л./0,1 п.л.).

16. Liu H., Dumansky A.M., Alimov M.A. Dependence of failure envelope on strain rate for unidirectional CFRP // Journal of Physics: Conf. Ser. 2021. Vol. 1990. No. 012021. (0,375 п.л./0,2 п.л.).