

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра теории пластичности**

На правах рукописи
УДК 539.3

Антонов Федор Константинович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОБИВАНИЯ
ПРЕГРАД**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре теории пластичности механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

- Научные руководители: Член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор
Ломакин Евгений Викторович
- Кандидат физико-математических наук,
доцент
Моссаковский Павел Александрович
- Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор
Киселев Алексей Борисович
- Доктор технических наук,
профессор
Каримбаев Тельман Джамалдинович
- Ведущая организация: Институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится «12» ноября 2010г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.91 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ, механико-математический факультет, аудитория _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке механико-математического факультета МГУ (Главное здание, 14 этаж)

Автореферат разослан «___» октября 2010г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.91,
профессор

С.В. Шешенин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы

Динамические процессы, связанные с пробиванием преград, с давних пор представляют особый интерес для ученых-механиков. Это обусловлено, прежде всего, большой практической важностью решения подобного рода задач, а также сложностью и многообразием явлений, сопровождающих такие процессы.

Задачи о пробивании преград возникают в широком круге областей науки и техники, таких как защитное вооружение и военная техника, строительная механика, механика природных процессов и горное дело, транспортная и аэрокосмическая техника.

Объектом исследования настоящей работы является одна из наиболее интересных задач этого круга, связанная с анализом взаимодействия оборвавшихся фрагментов роторов газотурбинных двигателей (ГТД) с корпусами.

Большое число экспериментальных и теоретических исследований посвящено разработке подходов к оценке непробиваемости корпусов. Тем не менее, известные в настоящее время методы решения этой задачи не позволяют надежно прогнозировать результат взаимодействия оторвавшегося фрагмента ротора с корпусом в условиях возрастающих требований к его точности.

В связи с этим, тема диссертации, посвящённой исследованию динамических процессов пробивания преград с целью разработки надежной методики расчётной оценки непробиваемости корпусов, учитывающей особенности взаимодействия фрагментов ротора с корпусом, разнообразие реализующихся термомеханических процессов и особенности поведения материалов в этих условиях, является, несомненно, актуальной.

Цель диссертационной работы

Целью диссертации является разработка и научное обоснование надежного подхода к решению задачи о результатах взаимодействия оборвавшихся фрагментов роторов с корпусами ГТД, базирующегося на анализе указанного взаимодействия и реализующихся в нем термомеханических процессов, а также учитывающего характерные для этих условий свойства материалов.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

1. Развитие экспериментально-вычислительного метода решения существенно нелинейных краевых задач динамической прочности в рамках проблемы анализа последствий взаимодействия оборвавшихся фрагментов роторов ГТД с корпусами.

2. Разработка комплекса виртуальных и натуральных экспериментов для определения свойств материалов и моделей контактного взаимодействия.

3. Разработка методики и проведение комплекса виртуальных экспериментов, моделирующих обрыв лопатки, и верификация разработанного метода путём сравнения результатов с реальным экспериментом по обрыву лопатки на разгонном стенде ЦИАМ.

4. Проведение исследований динамического поведения перспективного материала на основе многослойных органопластиков, пропитанных нанокompозитной жидкостью, с целью оптимизации конструкции корпусов двигателя по условиям непробиваемости и минимизации веса.

Научная новизна

1. Предложено развитие аппроксимационного метода СН-ЭВМ А.А. Ильюшина применительно к существенно нелинейным контактным задачам динамической прочности. Построена итерационная экспериментально-вычислительная процедура, лежащая в основе этого метода. Разработан общий подход к реализации серий испытаний, воспроизводящих характерные для данного класса задач термомеханические состояния и позволяющий строить аппроксимационные соотношения, определяющие материальный отклик на этих состояниях. Разработана процедура согласования результатов натуральных и численных экспериментов.

2. Решена задача о взаимодействии оборвавшейся лопатки компрессора низкого давления авиационного ГТД с корпусом и проведено сравнение результата с данными натурального эксперимента. На основе полученного численного решения проведена процедура классификации реализуемых термомеханических состояний, которая является достаточно общей для подобного класса задач. По результатам численного моделирования взаимодействия оборвавшейся лопатки с корпусами различных конструкций, сделан вывод о неэффективности сложных конструктивных решений в этой области.

3. Получены новые данные по динамическим свойствам перспективного композиционного материала на основе нанокompозитной жидкости (НКЖ). Впервые доказана возможность представления НКЖ моделью Ньютоновой жидкости, определены параметры этой модели. Показана ключевая роль контактных условий в механизме увеличения энергоёмкости многослойной преграды из органопластиковых полотен с нанокompозитной пропиткой.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена применением известных подходов и методов, сравнением основных результатов с экспериментальными данными. Наиболее важные результаты исследования получены на основе большого числа специальных натуральных и виртуальных верификационных экспериментов, проведенных с использованием апробированных численных методов и

схем, а так же аттестованного экспериментального оборудования и современных методов обработки результатов испытаний.

Научная и практическая ценность работы

Изложенный в диссертации метод может использоваться для решения широкого круга задач, для которых возможность проведения натуральных полномасштабных экспериментов ограничена, их реализация экономически нецелесообразна или в принципе невозможна. К таким задачам относятся, в частности, моделирование различного рода аварийных ситуаций, которые могут приводить к катастрофическим последствиям. С применением разработанного метода представляется возможным решать задачу создания лёгких непробиваемых корпусов. Эта тематика особенно актуальна в последнее время, в связи с разработкой двигателей для истребителей фронтовой авиации 5-ого поколения. Безусловна актуальность этой задачи и для гражданского авиадвигателестроения.

На основе проведенного численного анализа пробиваемости различных вариантов корпусов ГТД сделан важный практический вывод об относительной неэффективности сложных конструктивных решений в обеспечении непробиваемости по сравнению с традиционным цилиндрическим или коническим корпусом. Подтверждено, что наиболее эффективным вариантом конструкции корпуса будет слоистая конструкция с тонким металлическим слоем и системой слоёв из композиционных материалов.

Подробно изучены динамические свойства новейшего композиционного материала – нанокompозитной жидкости. Предложена модель динамического поведения НКЖ, определены параметры этой модели.

Исследованы динамические свойства титанового сплава ВТ6, получены данные по динамическим кривым деформирования, параметрам разрушения и динамического трения.

Апробация работы

Часть результатов работы получена и использовалась в рамках исследований по гранту РФФИ № 09-08-01229-а.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры теории пластичности МГУ, на «Ломоносовских чтениях» (МГУ, 2009, 2010), на международной конференции Двигатели-2009 (Украина, Рыбачье, сентябрь 2009), на IV международной конференции Механика-2009 (Беларусь, Минск, декабрь 2009), на международной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики» (Тула, ТулГУ, ноябрь 2009), на конференции-конкурсе молодых ученых (Москва, НИИ Механики МГУ, 2009), на международной конференции “11th International LS-DYNA Users conference”, (США, Дирборн, июнь 2010), на научных семинарах кафедры теории упругости, кафедры газовой и волновой динамики, кафедры

механики композитов МГУ, на научно-техническом совете ФГУП «ММПП «Салют». Часть результатов работы была представлена в докладе на конкурсе У.М.Н.И.К. 2009, по результатам которого автор был признан победителем конкурса.

Результаты работы использовались при разработке корпусов вентиляторов перспективных двигателей в конструкторском бюро перспективных разработок ФГУП «ММПП «Салют»».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 128 страниц печатного текста, включая 79 иллюстраций, 5 таблиц. Список литературы содержит 115 наименований. По теме диссертации опубликовано 5 работ, одна из них – в издании из списка ВАК.

Автор выражает глубокую благодарность за постоянную поддержку и содействие работе, за помощь и критические замечания во все время её написания научным руководителям – члену-корреспонденту РАН, доктору физ.-мат наук, профессору Ломакину Е.В. и кандидату физ.-мат. наук, доценту Моссаковскому П.А.

Неоценимую помощь при работе над диссертацией оказали замечания и пожелания, а так же постоянная поддержка научного консультанта, Генерального конструктора ФГУП «ММПП «Салют», доктора технических наук, профессора Колотникова М.Е.

Также автор выражает признательность сотрудникам лаборатории динамических испытаний Института механики Нижегородского государственного университета: заведующему лабораторией, доктору технических наук, профессору Брагову А.М., доктору физ.-мат. наук, профессору Ломунову А.К., кандидату технических наук Константинову А.Ю. за предоставленные экспериментальные данные и всестороннюю помощь при написании работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, дается краткое содержание диссертационной работы и литературный обзор.

В первой главе излагается состояние проблемы, формулируются цель и задачи исследования. Рассматриваются существующие конструктивные решения в области обеспечения непробиваемости корпусов ГТД при обрывах элементов роторов. Подробно описаны существующие методики расчета на пробиваемость. На протяжении многих лет основным инженерным методом оценки непробиваемости являлся полуэмпирический подход, основывающийся на сравнении кинетической энергии оборвавшейся лопатки с энергопоглощающей способностью корпуса. Известно, что расчет по полуэмпирическим методикам носит консервативный характер и приводит к избыточной толщине корпуса. В последнее время широкое распространение получили

расчетные методы на основе прямого трёхмерного компьютерного моделирования обрыва лопатки. Однако результаты такого анализа не могут считаться надежными без проведения специальной процедуры верификации используемых в расчетах математических моделей и их параметров.

Таким образом, для оценки непробиваемости в инженерной практике в настоящее время применяются следующие подходы:

- натурный эксперимент по обрыву лопатки на полноразмерном двигателе или отдельных роторных узлах;
- полуэмпирические методы;
- компьютерное моделирование.

Тем не менее, до сих пор отсутствуют методики, позволяющие с необходимой точностью прогнозировать результат взаимодействия оторвавшегося фрагмента ротора с корпусом.

Так же в первой главе приводится обзор материалов, применяемых в конструкциях корпусов современных газотурбинных двигателей. Отмечено, что в настоящее время в качестве защиты корпусов от пробивания при обрыве лопатки широко используются композиты из тканых органопластиковых полотен с различными связующими. По данным многочисленных экспериментальных исследований [1], защитные свойства преграды, представляющей собой многослойный пакет из органопластикового тканого композита, могут быть улучшены без существенного увеличения ее массы путем предварительной пропитки всего пакета субстанцией, которую в англоязычной литературе принято называть Shear Thickening Fluid (жидкость, вязкость которой зависит скоростей сдвиговых деформаций).

Во второй главе излагается комбинированная экспериментально-вычислительная методика решения задач динамической прочности, реализованная в виде итерационной процедуры, идеологически близкой методу СН-ЭВМ А.А. Ильюшина [2]. Суть метода состоит в классификации полученных при численном решении краевой задачи пластичности траекторий деформаций с последующим воспроизведением в эксперименте на сложное нагружение (СН) тех из них, которые не были включены в класс допустимых траекторий для используемой в расчете модели материала. Для вычисления материального отклика на подобных траекториях при проведении повторных расчетов в рамках итерационной процедуры решения краевой задачи используются аппроксимационные соотношения, построенные по результатам проведенных СН-экспериментов.

Ниже приведены основные термины и обозначения, используемые при описании метода.

Локальный термомеханический процесс (локальный ТМП) точки (частицы среды) в момент времени t вводится как

$$\Pi_{\tau} = \Pi_{\tau}\{\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T\}_0^t$$

где ε^p – накопленная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скоростей деформаций, T – температура.

Термомеханический процесс на контактной границе Γ двух сред определяется как:

$$\Pi_{\tau}^{\Gamma} = \Pi_{\tau}^{\Gamma}\{c_{ab}, v_{ab}, p_n, T\}_0^t$$

где c_{ab} – параметр, характеризующий чистоту обработки границы контакта между материалами, v_{ab} – относительная скорость скольжения контактных поверхностей, p_n – нормальное давление на границе контакта, T – температура;

Материальным откликом в точке в момент времени t назовём пару $R_t = R\{\sigma_{ij}, \omega\}$, определяемую напряжениями σ_{ij} и параметром повреждённости ω . Материальным откликом в точке, принадлежащей контактной границе Γ раздела двух сред – пару $R_t^{\Gamma} = R^{\Gamma}\{\tau_{ab}^{\Gamma}, \omega^{\Gamma}\}$, где τ_{ab}^{Γ} – вектор касательных напряжений, ω^{Γ} – параметр контактной изнашиваемости.

В качестве обобщенного ТМП принимается совокупность $\Pi = \{\Pi_t, \Pi_t^{\Gamma}\}$, а в качестве обобщенного материального отклика – совокупность $R = \{R_t, R_t^{\Gamma}\}$.

Моделью поведения материала на множестве локальных ТМП называется отображение $M(\Pi)$, определяемое набором параметров $\{\alpha_i, \beta_j\}$ (определяющие соотношения, критерий разрушения, законы трения на контактных поверхностях), которое каждому ТМП ставит в соответствие модельный отклик $M = M\{\sigma, \omega\}$. В том случае, если модельный отклик на всех ТМП множества совпадает с некоторой предписанной погрешностью δ с их материальным откликом, то считается, что модель поведения материала применима (с допуском δ) к данному множеству локальных ТМП. Такие ТМП называются допустимыми для этой модели. Все локальные ТМП, допустимые для некоторой модели, образуют класс допустимых ТМП. Класс локальных ТМП называется воспроизводимым, если существуют такие его представители, которые можно воспроизвести в независимых верификационных экспериментах для измерения их материальных откликов.

В основу подхода положены следующие гипотезы:

1. Модельный отклик в каждой точке элемента конструкции однозначно определяется её локальным ТМП.

2. Все классы локальных ТМП, реализуемые в конструкции, воспроизводимы.

В динамических краевых задачах разумно вместо ТМП рассматривать характерные термомеханические состояния (ТМС) $S_{\tau} = S_{\tau}\{\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T, \xi\}$ – осредненные по времени ТМП.

Краевая задача решается методом прямого компьютерного моделирования на виртуальном стенде последовательными итерациями в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1.

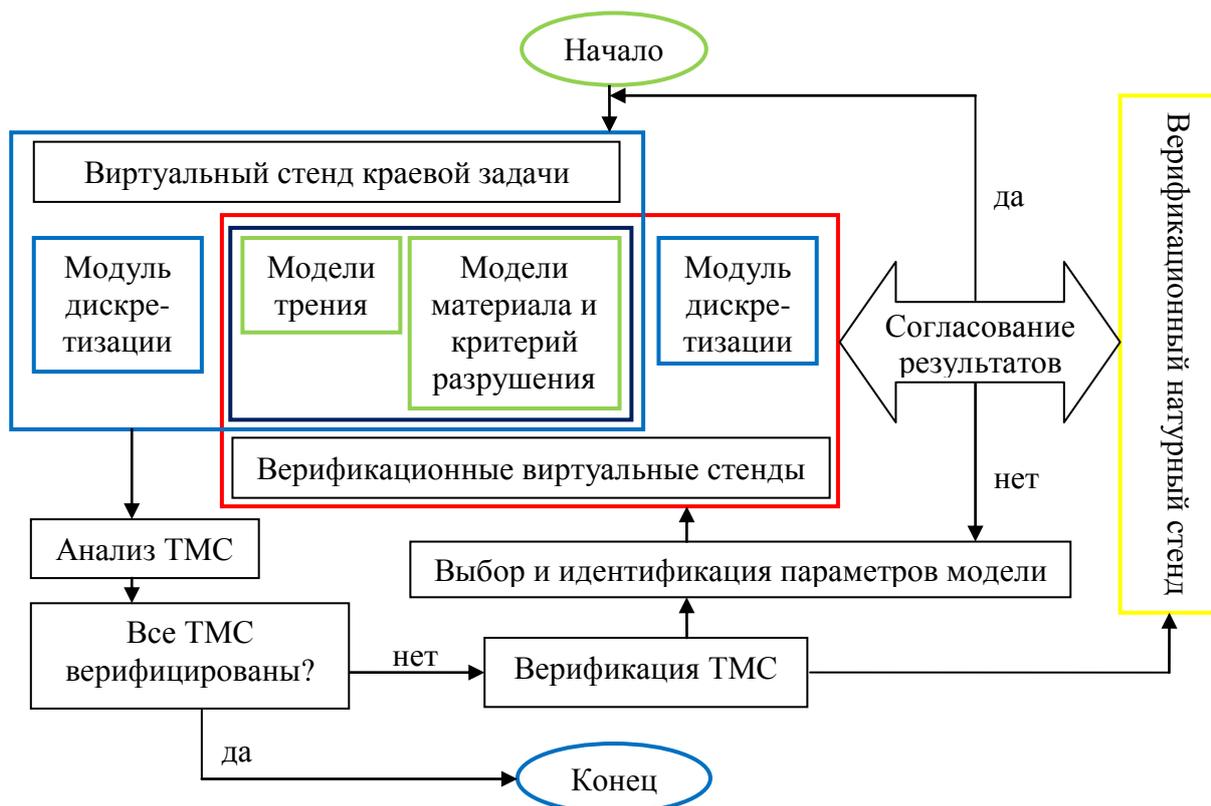


Рис 1. Решение краевой задачи динамической прочности.

На первом шаге отклик на всех возможных ТМС определяется в соответствии с одной выбранной моделью поведения материала. По результатам решения задачи производится классификация ТМС, полученных в решении. Для каждого класса ТМС определяется несколько представительных ТМС, которые можно воспроизвести в независимых верификационных экспериментах. При помощи таких экспериментов подбирается модель поведения материала, в соответствии с которой вычисляются материальные отклики на этих классах на следующем шаге итерации. После этого заново проводится классификация полученных ТМС и описанная выше процедура повторяется до тех пор, пока все классы ТМС не будут верифицированы.

В качестве иллюстрации подхода рассматривается компьютерная экспертная система [3] оценки непробиваемости корпусов (КЭС) при обрыве лопатки, в основе которой лежит описанный метод.

Компьютерная экспертная система оценки непробиваемости корпусов ГТД при обрыве лопатки представляет собой систему взаимосвязанных натуральных и вычислительных экспериментов для обеспечения надежного предсказания пробивания корпуса ГТД при всех характерных сценариях обрыва лопатки. В состав компьютерной экспертной системы входит набор экспертных виртуальных стендов для компьютерного моделирования возможных сценариев обрыва лопатки с целью формирования экспертной оценки о пробиваемости или непробиваемости корпуса реального изделия, а также набор

верификационных виртуальных стендов для настройки и верификации КЭС.

Качество компьютерного моделирования на виртуальных стендах в основном определяется качеством реализации трех независимых структурных блоков, входящих в состав каждого виртуального стенда:

- блока материальных моделей;
- блока моделей контактного взаимодействия;
- блока конечно-элементной дискретизации.

Блок материальных моделей виртуальных стендов КЭС вычисляет материальный отклик $R_t = R\{\sigma_{ij}, \omega\}$ на реализуемых в расчете внутренних локальных термомеханических состояниях $S_t = S_t\{\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T, \xi\}$ в соответствии с выбранной моделью материала.

Блок моделей контакта вычисляет материальный отклик на граничных локальных термомеханических состояниях $S_t^\Gamma = S_t^\Gamma\{c_{ab}, v_{ab}, p_n, T\}$ в соответствии с выбранной моделью контакта.

Блок конечно-элементной дискретизации является независимым структурным элементом виртуальных стендов, определяющим степень детализации геометрической и конечно-элементной моделей.

Система натурных экспериментов для настройки и верификации КЭС включает следующие типы верификационных тестов:

- экспериментальные стенды для статических испытаний на растяжение, сжатие и кручение;
- экспериментальные стенды для определения динамических свойств материалов с использованием методики разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) для испытаний на растяжение, сжатие и кручение;
- экспериментальные стенды исследования влияния вида напряженного состояния на динамические свойства материалов и определения критерия локального разрушения с использованием модифицированного метода РСГ;
- экспериментальные стенды исследования динамического закона трения с использованием модифицированного метода РСГ;
- экспериментальные стенды для измерения ударной вязкости;
- экспериментальные стенды для реализации баллистических ударных тестов, имитирующих простые сценарии соударения лопатки с корпусом.

Процедура настройки и верификации КЭС предусматривает построение соответствующих виртуальных стендов для согласования материальных откликов на локальных ТМС, реализуемых в расчете на экспертных виртуальных стендах. Результатами процедуры верификации и настройки модуля моделей материалов для титанового сплава ВТ6 являются:

- набор динамических диаграмм деформирования (рис. 2);
- критерий локального разрушения (максимальная интенсивность пластических деформаций $\varepsilon_{\text{разр}}=0.1$);
- параметры закона трения на контактных парах Ti-Ti (таблица 1), заданного в форме:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_n = \bar{v}_{ab} \\ \tau_n = v_{ab} \\ \tau_n = \min \{ f(S_\tau^\Gamma) p_n, VC \} \end{cases}, \quad \mu = F_d + (F_s - F_d) e^{-v_{ab}^{DC}}$$

где v_{ab} – относительная скорость скольжения контактных пар,
 τ_n и p_n – тангенциальная и нормальная составляющие контактной силы.

Таблица 1.

Параметры закона трения для контактной пары Ti-Ti.

F_S	F_D	DC	VC
0.5	0.25	0.1	$7.55 \cdot 10^8$

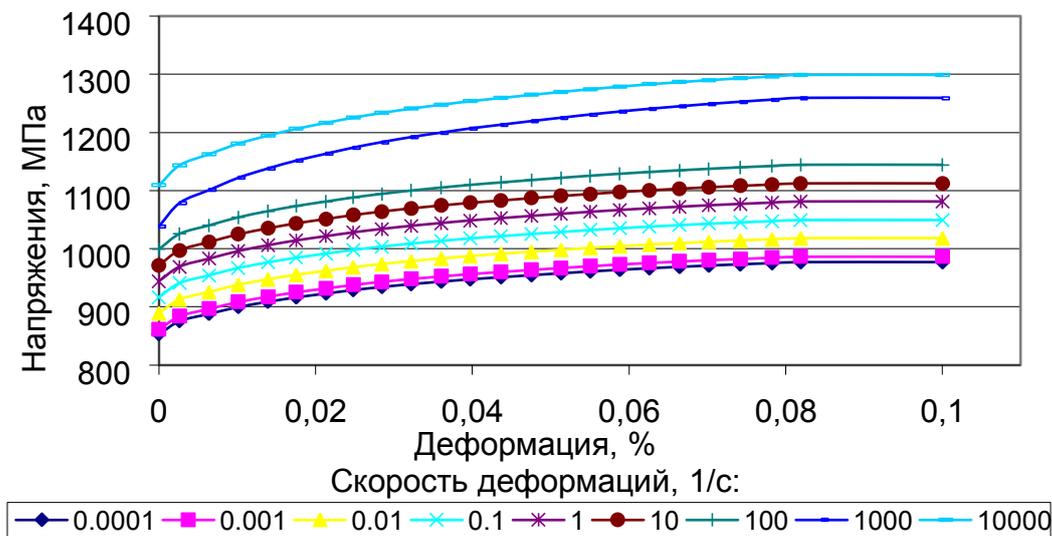


Рис. 2. Кривые динамического деформирования VT6.

В третьей главе приводятся результаты численных расчетов на пробивание различных вариантов корпусов первой ступени компрессора низкого давления (КНД) при обрыве лопатки, проведенных в рамках сравнительного анализа. Выполнено сравнение результатов численного моделирования реального эксперимента по обрыву лопатки на разгонном стенде в ЦИАМ с натурным экспериментом. Результаты расчета приведены на рис. 3.

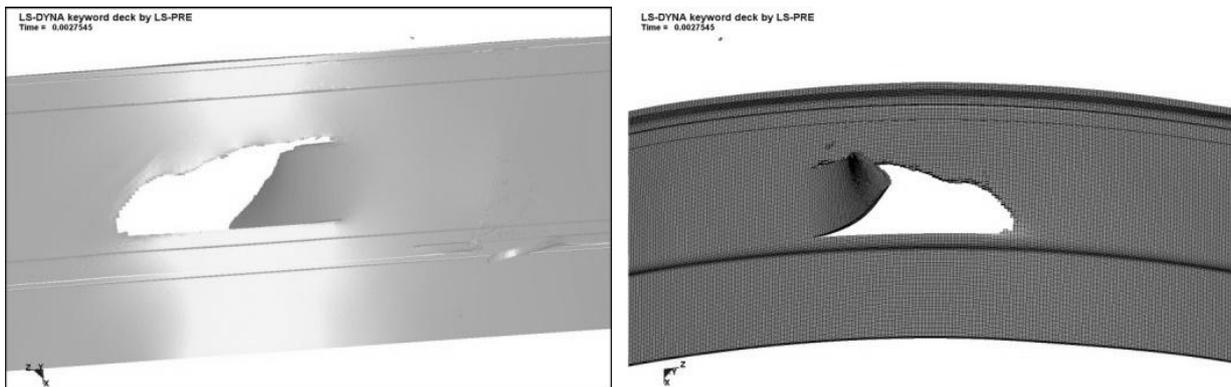


Рис. 3. Разрушение корпуса по результатам расчета

На рис. 4 приведены фотографии реального корпуса после испытаний на разгонном стенде.

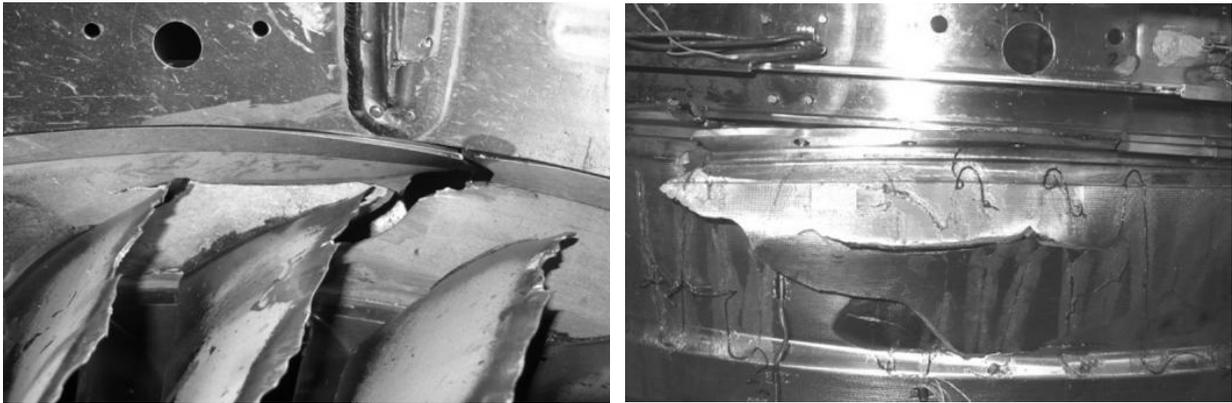


Рис. 4. Характер разрушения реального корпуса

Несмотря на хорошее согласование натурального и виртуального экспериментов, нет оснований утверждать, что аналогичные расчеты всегда будут приводить к адекватным результатам. Этот подход может использоваться для предварительной оценки пробиваемости корпусов в тех случаях, когда не требуется априорная точность расчетов (таких как, сравнительный анализ различных конструкций).

По результатам проведенных расчетов выполнен анализ основных ТМС, реализующихся в процессе взаимодействия лопатки с корпусом. Можно утверждать, что практически на всем процессе реализуются простые траектории деформаций. Однако критический момент первой фрагментации лопатки, за которой следует второй удар, сопровождается быстрым изменением параметра вида напряженного состояния в области разрушения. Модели материала, основанные на теории течения с изотропным упрочением, могут неадекватно описывать такие процессы, поэтому для построения более точного решения задачи необходимо провести уточнение материального отклика на этом ТМС.

Далее рассмотрено несколько вариантов компоновок металлических корпусов, выбранных по результатам патентных исследований и исследований прочих источников.

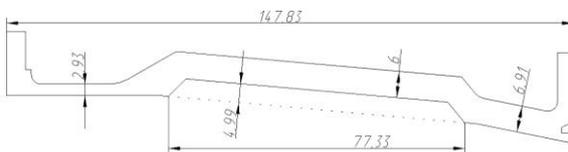


Рис. 5а. Корпус с конической геометрией проточной части.

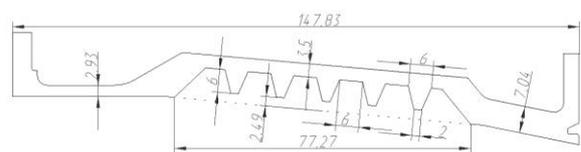


Рис. 5б. Корпус с рассекателями.



Рис. 5в. Корпус с выпуклой геометрией.

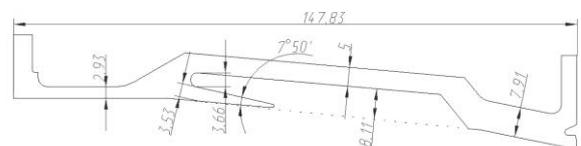


Рис. 5г. Корпус с жестким бампером.

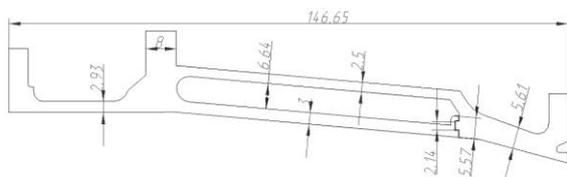


Рис. 5д. Корпус с двойной стенкой

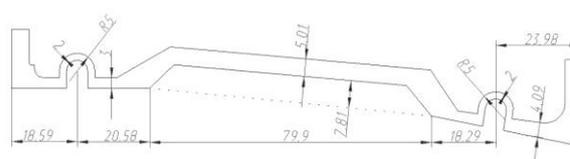


Рис. 5е. Корпус с амортизаторами.

На основе выбранных конструкций были построены геометрические модели корпусов и проведены численные расчеты, моделирующие процесс обрыва лопатки и последующего её взаимодействия с корпусом.

В результате расчетов для каждого из вариантов конструкций корпусов дано описание указанного процесса, сделаны выводы о пробиваемости той или иной конструкции, определены размеры трещин и областей вскрытия. В таблице 2 приведены сводные данные по результатам проведенных расчетов.

Таблица 2.

Результаты расчетов различных вариантов корпусов.

Тип корпуса	Пробивание	Диаметр области вскрытия, мм
Традиционный	нет	58
С рассекателями	да	180
С выпуклой геометрией	нет	59
С бампером	да	310
С двойной стенкой	да	410
С амортизаторами	да	Расслоение корпуса

Выполненные расчеты не подтвердили эффективность рассмотренных конструкций корпусов в обеспечении непробиваемости по сравнению с традиционным корпусом. Существенным недостатком всех предложенных схем является их ориентированность на конкретную реализацию процесса удара, в то время как в реальном процессе осуществляется множество ударов с различными параметрами.

По-видимому, наиболее эффективным вариантом конструкции корпуса ГТД может служить комбинированная слоистая конструкция с тонким металлическим слоем и системой слоёв из композиционных материалов, являющихся интенсивными поглотителями энергии удара. Однако, для проведения расчетов таких конструкций необходимо исследование свойств материалов рассматриваемой композиции.

В четвертой главе приведены результаты экспериментально-вычислительных исследований динамического поведения композиционного материала на основе многослойных органопластиковых полотен с пропиткой из нанокompозитной жидкости (НКЖ, STF). НКЖ – композитный материал на основе наночастиц диоксида кремния, внедрённых в полимер – полиэтиленгликоль, который нетоксичен и стабилен в широком диапазоне температур. Целью исследований являлось построение математической модели композиции. С применением полученной модели выполнен сравнительный анализ энергоёмкости различных вариантов конструкций защитных оболочек.

В главе дается литературный обзор работ, посвященных исследованию свойств НКЖ, описывается её состав, способ изготовления и основные свойства, приводится описание модификации метода Кольского, применяемого для исследования динамических свойств мягких грунтов и слабоплотных материалов [4].

Исследование динамических свойств НКЖ проводилось на базе серий натуральных и виртуальных верификационных испытаний.

Динамические натурные испытания проводились в НИИ Механики Нижегородского госуниверситета. Эксперименты включали две серии испытаний. Первая серия (испытуемый материал в жесткой обойме) – для определения объемной сжимаемости НКЖ (схема экспериментальной установки приведена на рис. 6, вторая (в мягкой обойме) – для определения сдвиговой вязкости (рис. 7). Условия эксперимента выбирались таким образом, чтобы реализовать практически интересующий диапазон изменения скоростей деформаций в НКЖ (от 200 до 2000 с⁻¹).

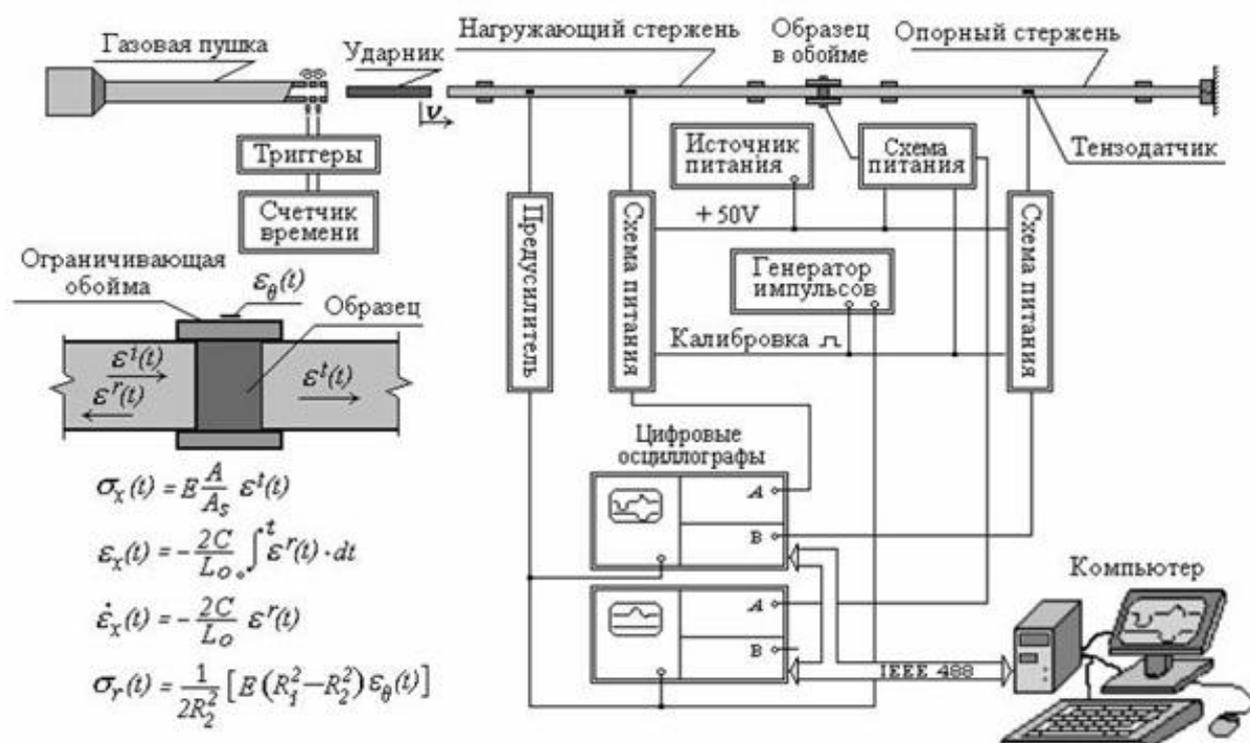


Рис. 6. Схема установки для определения объемной сжимаемости НКЖ.

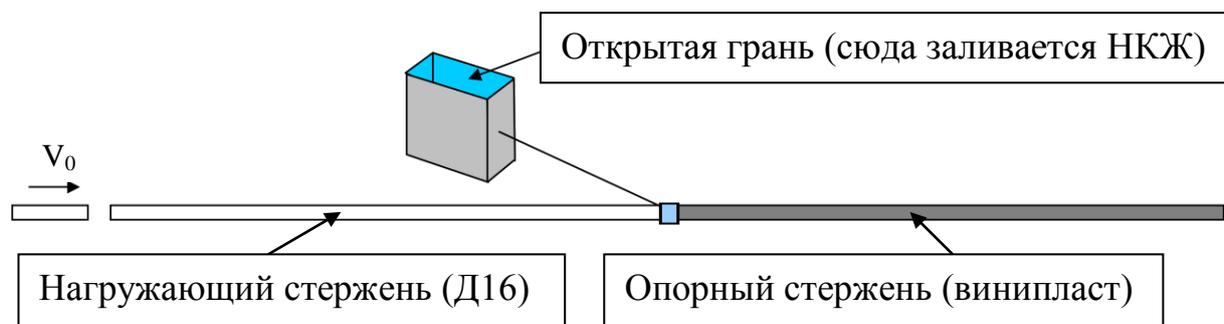


Рис. 7. Схема установки для определения сдвиговой вязкости НКЖ.

Результаты испытаний в жесткой обойме при различных скоростях деформаций от 200 до 2500 с⁻¹ показали, что напряженно-деформированное состояние в образцах соответствует состоянию всестороннего гидростатического сжатия. Экспериментальная диаграмма зависимости напряжений от деформаций приведена на рис. 8.

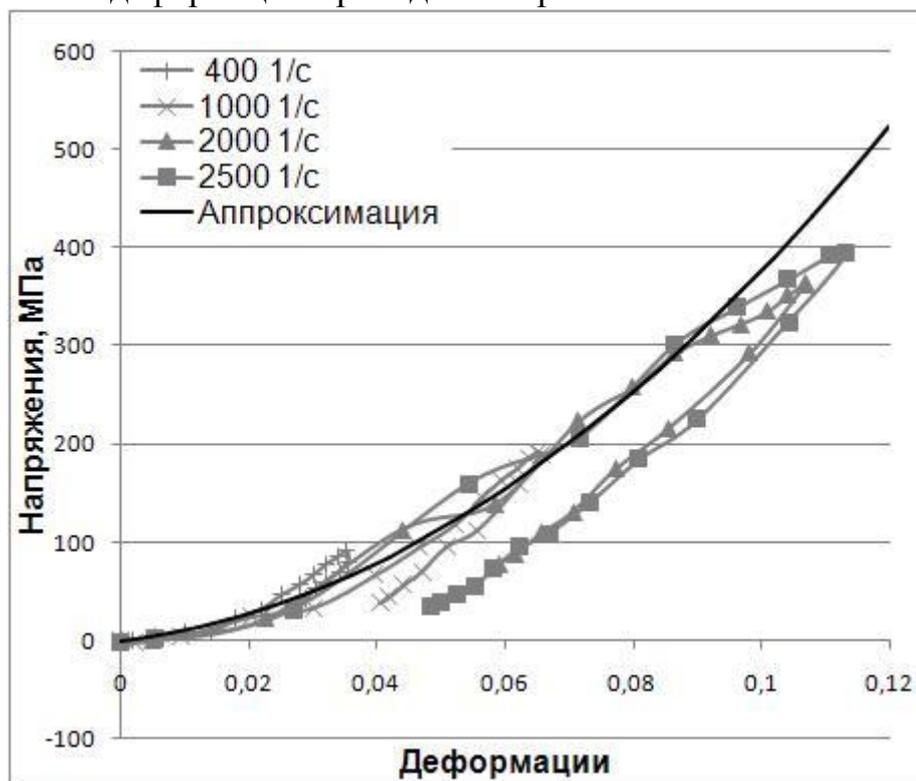


Рис. 8. Экспериментальная диаграмма связи между напряжением и объемной деформацией.

Связь между напряжением и объемной деформацией не зависит от скорости деформации и хорошо аппроксимируется квадратичным соотношением:

$$-p = K_1\theta + K_2\theta^2$$

где p – гидростатическое давление, θ – объемная деформация, $K_1=767$ МПа, $K_2=30000$ МПа.

Для исследования сдвиговой вязкости НКЖ проводились эксперименты в мягкой обойме со скоростями деформаций 200, 500, 1000 и 2000 с⁻¹. На рис. 9 изображены осредненные экспериментальные диаграммы напряжения (по показаниям тензметра на опорном стержне) от времени. После анализа результатов испытаний было сделано предположение, что характерный пик на графике – следствие высокой начальной неоднородности НДС в образце. Для подтверждения этой гипотезы были проведены виртуальные эксперименты по той же программе.

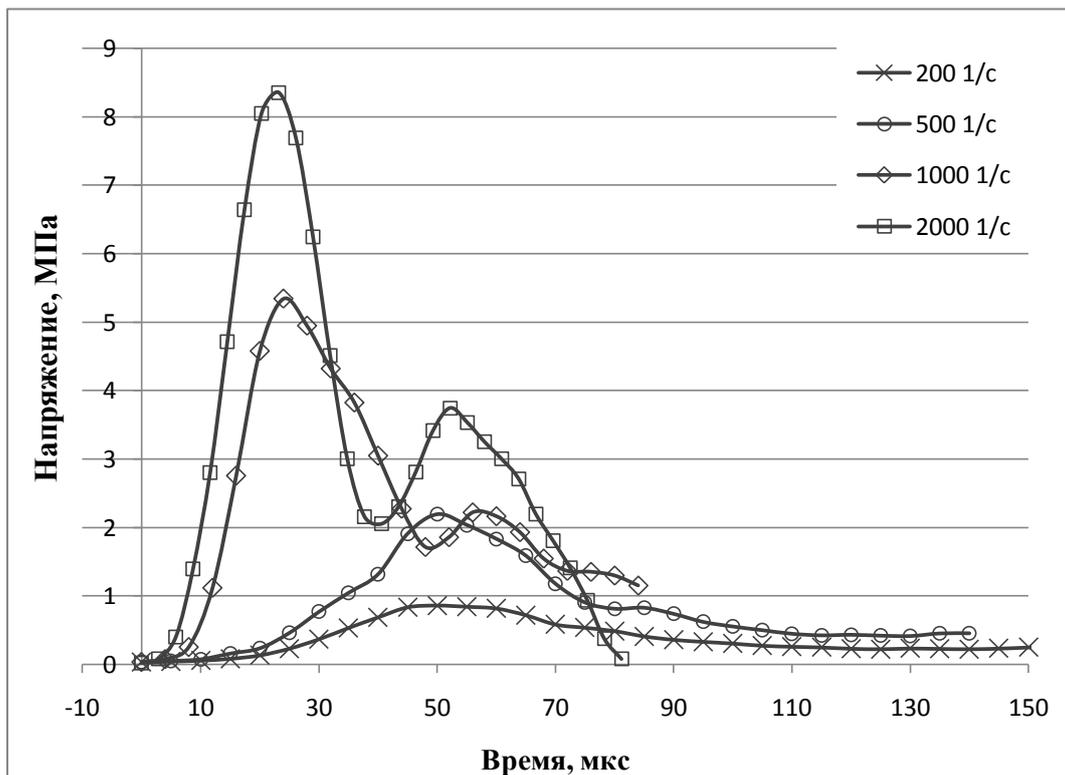


Рисунок 9. Экспериментальные диаграммы напряжения.

Виртуальные эксперименты проводились с использованием нелинейного кода LS-DYNA. Для моделирования сдвиговых свойств НКЖ использовалась модель ньютоновой жидкости, записываемая в терминах девиаторов напряжений и скоростей деформаций в виде: $s_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij}$

Объемная сжимаемость задавалась с использованием квадратичной аппроксимации экспериментальных диаграмм испытаний в жесткой обойме по формуле $-p = K_1\theta + K_2\theta^2$.

Начальное значение сдвиговой вязкости получено путем осреднения секущих модулей σ/ϵ экспериментальных диаграмм испытаний в мягкой обойме после исключения начального пика напряжений. В силу слабой зависимости сдвиговой вязкости от скорости деформаций в расчетах принималось осредненное значение сдвиговой вязкости равное 400 Па·с.

Программа виртуальных экспериментов состояла из серий расчетов на виртуальном стенде, воспроизводящем натурные испытания с образцами в мягкой обойме при скоростях ударника 7.5, 15 и 30 м/с. При этом для лучшего согласования результатов натурных и виртуальных испытаний дополнительно варьировался коэффициент трения между образцом и стержнями (от 0 до 1).

Результаты виртуальных испытаний при различных скоростях деформаций при коэффициенте трения, равном 0.1 приведены на рис. 10.

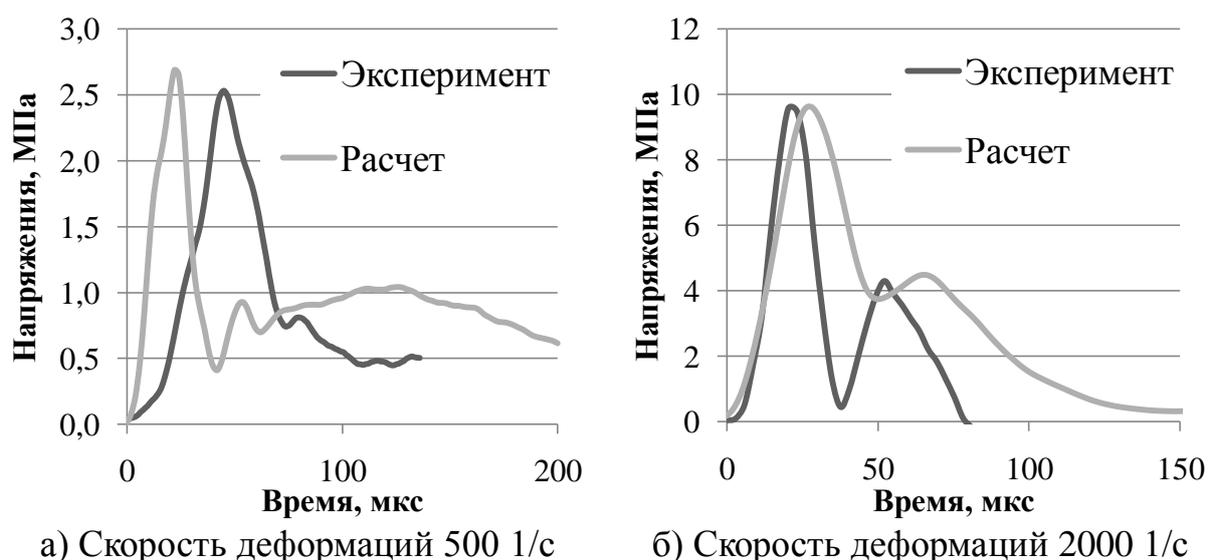


Рис. 10. Диаграммы экспериментальной и расчетной зависимости напряжений от времени при различных скоростях.

Получено хорошее качественное соответствие результатов виртуальных и натуральных испытаний. Наличие характерного пика напряжений в виртуальном эксперименте подтверждает высказанное предположение о наличии высокой начальной неоднородности НДС в образце, и, как следствие, возникновение пика на графиках экспериментальной зависимости. Небольшое рассогласование по времени, наблюдаемый на графиках, вызван, по-видимому, возможными микропустотами в коробке с жидкостью, наличием зазоров между торцами мерных стержней и наружными стенками коробки, а также погрешностями синхронизации.

Для сравнительной оценки энергоемкости преград из органопластика и композиции органопластик + НКЖ, а также для уточнения контактных условий между НКЖ и основой, были проведены натурные и виртуальные тесты на пробиваемость с пропитанной НКЖ и сухой органопластиковой преградой. Испытания проводились на образцах (преградах), прикрепленных к мастичному блоку при обстреле их металлическими шариками. Протокол испытаний приведен в таблице 3.

Таблица 3.

Протокол ударных испытаний

№	Скорость, м/с	Давление, атм	Диаметр отпечатка, мм	Глубина отпечатка, мм	примечания
1	89.55	3	12.1	4	контрольный
2	93.75	3	13	3.4	пропитанный
4	90.91	3	12.4	4.3	контрольный
5	85.71	3	12.55	3.2	пропитанный
6	113.21	6	13.3	6.8	контрольный
7	107.14	6	13.6	4.2	пропитанный
8	107.14	6	13.3	6.2	контрольный
9	111.11	6	14.6	4.5	пропитанный

№	Скорость, м/с	Давление, атм	Диаметр отпечатка, мм	Глубина отпечатка, мм	примечания
10	193.55	20	15.4	11.1	контрольный
11	187.5	20	16.8	8.5	пропитанный
3	89.55	3	10	9.2	без преграды

В связи с тем, что расчет трёхмерной задачи требует значительных вычислительных мощностей, в рамках данной работы моделирование ударных тестов проводилось в двухмерной постановке.

Для аттестации математической модели НКЖ был построен виртуальный стенд, имитирующий ударный тест на пробиваемость пропитанного НКЖ и сухого элемента многослойной защитной оболочки.

Виртуальные эксперименты проводились при помощи метода конечных элементов с применением нелинейного кода LS-DYNA. Органопластиковые полотна моделировались упругим слоем, находящимся в состоянии плоской деформации. Модуль упругости полотна принимался равным модулю упругости нити (Кевлар), $E=124$ ГПа. Разрушение полотна инициировалось путем удаления элементов с удлинением, превышающим 2.4%. Для моделирования НКЖ применялась модель ньютоновой жидкости с параметрами, определенными по результатам испытаний по методу Кольского. Использовалось эйлерово представление конечно-элементной сетки. Процесс взаимодействия между НКЖ, волокнами, ударником и окружающей средой моделировался в обобщенной постановке Лагранжа-Эйлера. Дополнительно, между полотнами и жидкостью задавалось сухое трение, моделирующее трение между твердыми частицами НКЖ и волокнами.

Защитная оболочка представляет собой 4 слоя органопластика толщиной 0.2 мм, погруженных в НКЖ. Для оценки энергоемкости элементов защиты были проведены виртуальные ударные тесты с пропитанной НКЖ и сухой многослойной защитной оболочкой. При этом взаимодействие между НКЖ и ударником моделировалось в обоих случаях, что позволяет исключить из сравнения потери энергии, связанные с инерционными явлениями. Варьировался коэффициент трения между слоями и НКЖ от 0 до 1. Результаты расчетов приведены на рис. 11.

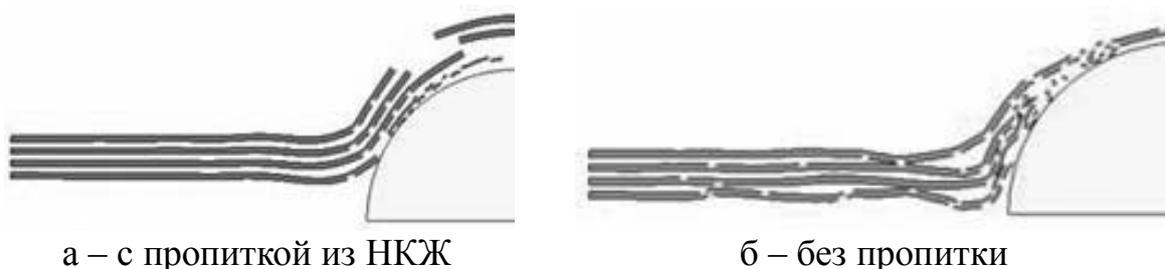


Рис. 11. Характер разрушения защитной оболочки.

Энергоемкость оценивалась по степени уменьшения кинетической энергии ударника. Наилучший результат получен при коэффициенте

трения, равном 0.1. Худший – у непропитанного элемента. На рис. 12 представлены графики зависимости энергии ударника от времени при различных значениях коэффициента трения между НКЖ и полотнами. Разница в энергии составляет около 15%, что соответствует результатам натуральных испытаний.

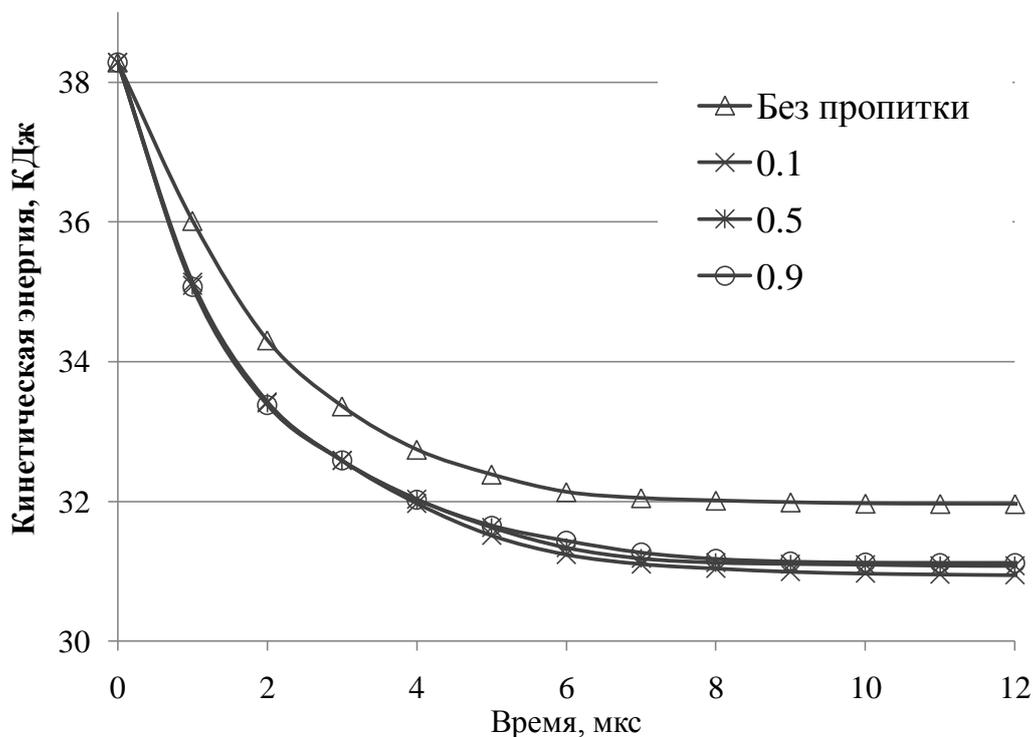


Рис. 12. Зависимость кинетической энергии ударника от времени при различных значениях коэффициента трения.

Проведены виртуальные тесты на пробивание трёх вариантов защитных оболочек:

- 1) Ударный тест на пробивание титановой оболочки толщиной 2.2мм.
- 2) Тест на пробивание элемента защиты, состоящего из титанового слоя толщиной 1.4мм с 12-ю слоями органопластика толщиной 0.2мм, без пропитки НКЖ.
- 3) Тест на пробивание титанового слоя с 12-ю слоями органопластика с НКЖ пропиткой.

Результаты расчетов показаны на рис. 13.

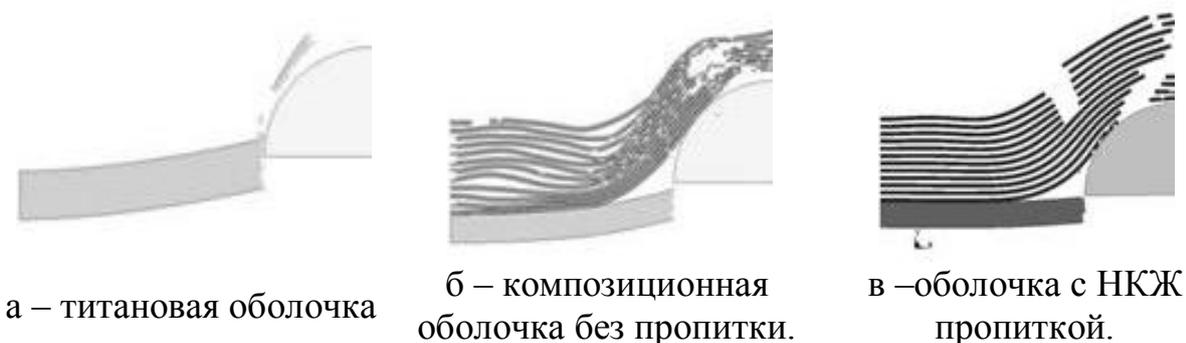


Рис. 13. Пробивание элементов защиты

Как известно, «схлопывание» слоёв оболочки способствует ухудшению её защитных характеристик. Наличие НКЖ пропитки между слоями препятствует возникновению данного эффекта. Пропитка влияет также на величину прогиба титановой основы. Так, прогиб основы непропитанного элемента защиты составляет 13мм, пропитанного – всего 3мм.

На рис. 14 изображены графики зависимости кинетической энергии ударника от времени для всех трёх видов защиты.

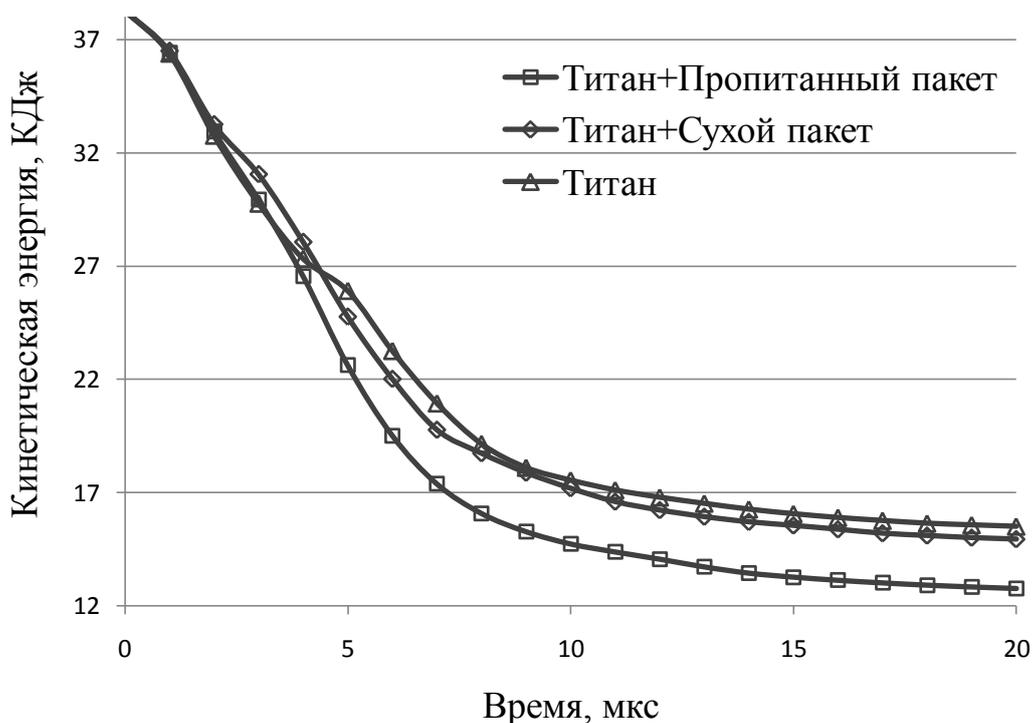


Рис. 14. Оценка энергоёмкости преграды.

Незначительная разница в значениях поглощенной энергии между чисто титановым элементом защиты и элементом защиты без пропитки обусловлена тем, что рассматриваемая задача исследуется в постановке, не учитывающей трение между волокнами внутри слоя.

Проведенные виртуальные ударные тесты на пробиваемость с пропитанными НКЖ и сухими элементами индивидуальной защиты показали большую эффективность первых. При этом улучшение эрнегопоглащающих способностей пропитанного элемента защиты обусловлено именно взаимодействием между волокнами композита и НКЖ. Для элементов защиты с титановой основой показано, что наличие НКЖ-пропитки в органопластиковом пакете позволяет не только увеличить энергоёмкость преграды, но и значительно уменьшить прогиб основы.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе и выносимые на защиту:

1. Применительно к динамическим процессам пробивания преград развит универсальный метод решения существенно нелинейных

контактных задач динамической прочности. Основные аспекты этого метода проиллюстрированы и реализованы на примере задачи о взаимодействии оторвавшейся рабочей лопатки ГТД с корпусом.

2. Разработана система специальных натуральных и виртуальных верификационных экспериментов, воспроизводящих основные термомеханические состояния, реализуемые в процессе взаимодействия лопатки с корпусом.

3. В рамках предлагаемого подхода решен ряд практических задач о пробиваемости различных вариантов корпусов, проведены сравнения полученных результатов с натурным экспериментом.

4. Разработана математическая модель перспективного композиционного материала на основе нанокompозитной жидкости, определены параметры этой модели. По результатам проведенных натуральных и виртуальных ударных тестов, показано, что тканые органопластиковые полотна с нанокompозитной пропиткой обладают повышенными энергопоглощающими характеристиками в сравнении с непропитанными полотнами.

Список цитируемой литературы

1. Lee Y.S., Wagner N.J. Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions. *Rheol. Acta*. V.42. P.199–208. 2003.

2. Ильюшин А.А. Метод СН-ЭВМ в теории пластичности. Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука. 1971. С.166-178.

3. Васин Р.А., Моссаковский П.А., Рязанцева М.Ю. Развитие экспериментально-вычислительного метода решения нелинейных задач механики. Сб. трудов Межд. н.-т. конф. «Инновации в машиностроении». 30-31 октября 2008. С.129-135.

4. Брагов А.М. Ломунов А.К. Сергеев И.В. Модификация метода Кольского для исследования свойств малоплотных материалов при высокоскоростном циклическом деформировании. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. т.42. №6. с.199.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Антонов Ф.К. О возможности улучшения защитных свойств многослойных преград при использовании связующих нового типа. Межвуз. Сб. Проблемы прочности и пластичности. Н. Новгород. Вып.72. С. 171-175.

2. Моссаковский П.А., Колотников М.Е., Антонов Ф.К. Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканого композита с нанокompозитной пропиткой. *Авиационно-космическая техника и технология*. Т.67. №10. 2009. Харьков. С.151-155.

3. Моссаковский П.А., Колотников М.Е., Антонов Ф.К. Экспериментально-вычислительное исследование свойств

нанокompозитной жидкости и её влияния на защитные характеристики многослойных преград из тканых композитов. Сб. трудов Межд. науч. конф. «Современные проблемы математики, механики, информатики». 23-27 ноября 2009. Тула. С.237-240.

4. Mossakovsky P.A., Bragov A.M., Kolotnikov M.E., Antonov F.K. Investigation of the shear thickening fluid dynamic properties and its influence on the impact resistance of multilayered fabric composite barrier. Proc. 10th intl. LS-DYNA users conf., 2010. Dearborn. P. 5.33-5.43.

5. Антонов Ф.К. Влияние нанокompозитной пропитки на пробиваемость многослойных преград из тканых композитов. Сб. трудов конференции-конкурса молодых ученых. 14-16 октября 2009. Москва. С.49-57.

6. Ломакин Е.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Колотников М.Е., Моссаковский П.А., Костырева Л.А., Антонов Ф.К. Моделирование поведения титанового сплава ВТ20 при ударном взаимодействии. Вестник ННГУ. 2010. Н. Новгород. (принята к публикации).

7. Lomakin E.V., Mossakovsky P.A., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Kolotnikov M.E., Vakshtein M.S., Antonov F.K. Investigation of Impact Resistance of Multilayered Woven Composite Barrier Impregnated with the Shear Thickening Fluid. Archive of applied mechanics. 2010. (принята к публикации).