

На правах рукописи



Архипов Илья Николаевич

**РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА ДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

**Работа выполнена в Томском государственном
архитектурно-строительном университете**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Югов Николай Тихонович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Макаров Павел Васильевич (ТГУ, г. Томск)

доктор физико-математических наук,
Светашков Александр Андреевич, (НИ ТПУ,
г. Томск)

Ведущая организация: **Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет**

Защита состоится «08» апреля 2011 года в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.265.03 при Томском государственном
архитектурно-строительном университете по адресу – 634003, г. Томск,
пл. Соляная, 2, корп. 4, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан «07» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Клопотов А.А.

Примечание: отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью
организаций, просим посылать в 2 экземплярах на адрес университета.
Факс: (3822) 65-03-17, e-mail: kaf_midk@mail.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. При проектировании новых образцов авиационно-космической техники возникает необходимость в создании методов расчета напряженно-деформированного состояния и разрушения конструкционных материалов, подвергающихся в процессе эксплуатации высокоскоростному ударному или взрывному нагружениям. Кроме того, существует проблема расчета динамического разрушения в технологических процессах высокоскоростной обработки металлов, сварке взрывом, взрывной штамповке, получении новых материалов в условиях взрывного нагружения. Многочисленные приложения находит задача о высокоскоростном ударе в физике высоких давлений, астрофизике, строительстве.

Природа явления высокоскоростного удара очень сложна. Соударение двух тел сопровождается различными процессами, возникновение и относительная роль которых зависит от геометрических размеров взаимодействующих тел, физико-механических характеристик материалов, и что более существенно, от скорости удара.

Полное описание высокоскоростного удара потребовало бы привлечения практически всех разделов механики сплошных сред, так как в полной теории необходимо учитывать пластическое течение и упругое деформирование, плавление и затвердевание, испарение и конденсацию, кинетику полиморфных фазовых переходов и химических превращений, кинетику процессов разрушения и их обратное влияние на прочностные характеристики и напряженно-деформированное состояние соударяющихся тел.

Таким образом, создание надежных методов прочностных расчетов конструкций, работающих в условиях кратковременных импульсных воздействий и больших скоростей деформаций, является **актуальным**.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Экспериментальное и теоретическое моделирование процессов деформирования и разрушения при ударно-волновом нагружении композиционных материалов, в том числе полученных с помощью нано-технологий» (номера проектов 07-01-00414а и 10-01-00573-а) и Аналитической Ведомственной Целевой Программы «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/4147 «Исследование возможностей применения новых материалов, полученных с помощью нанотехнологий, в области разработки средств высокоскоростного метания и динамического взаимодействия твердых тел».

Объект исследования: многослойные конструкции при больших скоростях деформаций от внешних ударных воздействий.

Предмет исследования: процессы деформирования и разрушения многослойных конструкций и ударников, содержащих новые композиционные материалы, в условиях высокоскоростного удара.

Цель работы: разработать методику расчета, позволяющую прогнозировать последствия высокоскоростного соударения твердого деформируемого тела произвольной формы с взрывчатым веществом (ВВ), защищенным системой пространственно-разнесенных многослойных экранов.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

- разработать методику и создать подпрограммы расчета для программного комплекса «РАНЕТ-3», позволяющие в полной трехмерной постановке проводить решение задач о высокоскоростном ударе тел произвольной формы с ВВ, защищенным системой пространственно-разнесенных многослойных экранов;
- исследовать прочность многослойных защитных конструкций в диапазоне скоростей удара до 2000 м/с, содержащих слой металлокерамики на основе диборида титана и карбида бора, на удар стальным сферическим ударником;
- исследовать иницирующее действие длинных стержней из различных материалов (в том числе и составных) при ударном взаимодействии в диапазоне скоростей удара 500–6000 м/с с ВВ, защищенным системой многослойных пространственно-разнесенных экранов.

Методология исследований и достоверность результатов

Исследования основаны на научных положениях механики деформируемого твердого тела. Использовался расчетно-экспериментальный метод исследования поведения материалов в условиях высокоскоростного удара. Достоверность полученных результатов, обоснованность выводов обеспечены физической и математической корректностью постановок задач и использованных методов их решения, проведением тестовых расчетов и сопоставлением полученных решений с результатами специально поставленных экспериментов и данных других авторов.

Научная новизна работы. Получены новые знания о процессе взаимодействия многослойных защитных преград с телами из различных материалов при высокоскоростном соударении. Конкретные научные результаты состоят в следующем:

- разработана методика расчета и созданы подпрограммы для программного комплекса «РАНЕТ-3», позволяющие в полной трехмерной постановке

проводить решение задач о высокоскоростном ударе тел произвольной формы с ВВ, защищенным системой пространственно-разнесенных многослойных экранов, расположенных под некоторыми углами к оси ударника;

- установлено, что при скорости 2000 м/с ударники из металлокерамики на основе диборида титана и железа (TiB_2+Fe) плотностью $5,73 \text{ г/см}^3$ производят на процесс инициирования детонации ВВ при пробитии экранной защиты первого типа такое же действие, как и стальные ударники, несмотря на то, что их масса на 25% меньше;
- установлено, что замена дюралюминиевого слоя защитной конструкции, состоящей из 10 мм дюралюминия и 4 мм стальной подложки, на слой металлокерамики на основе диборида титана и карбида бора (TiB_2+B_4C) толщиной 10 мм предохраняет защитную конструкцию от пробития стальным сферическим ударником массой 2 г при скорости удара 2000 м/с;
- получена зависимость детонации защищенного системой пространственно-разнесенных многослойных экранов ВВ ВВХ-9404 от скорости стальных стержней и углов их подхода.

Практическая значимость результатов работы. Практическое значение работы состоит в обеспечении возможности прогнозирования последствий высокоскоростного соударения ударников с ВВ, защищенными слоисто-разнесенными конструкциями.

Реализация работы. Программный комплекс «РАНЕТ-3» используется в НИИ Прикладной математики и механики Томского государственного университета (НИИ ПММ ТГУ) для анализа прочности защитных конструкций на высокоскоростной удар телами произвольной формы.

Результаты исследований использованы при подготовке курса «Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов» на строительном факультете Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ).

Личный вклад диссертанта состоит:

- в разработке методики расчета прочности защитных конструкций ВВ на высокоскоростной удар;
- в создании расчетных модулей для программного комплекса «РАНЕТ-3», позволяющего рассчитывать при взрывном и ударном нагружениях напряженно-деформированное состояние и разрушение в защитных конструкциях, представляющих набор пространственно-разнесенных многослойных экранов.

На защиту выносятся:

- методика расчета высокоскоростного взаимодействия тел произвольной формы из различных материалов с ВВ, защищенным системой пространственно-разнесенных многослойных экранов;
- результаты расчета прочности конструкции, содержащей слой металлокерамики на удар сферического элемента;
- результаты иницирующей способности стержневых ударников из различных материалов в широком диапазоне изменения скоростей удара и углов подхода при взаимодействии с ВВ, защищенным системой пространственно-разнесенных многослойных экранов.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК. Всего по теме диссертации опубликовано 18 печатных работ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях:

- VI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 2008);
- XXXIII Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова (г. Владивосток, 2008);
- Всероссийская конференция по математике и механике (г. Томск, 2008);
- Региональной научной конференции, посвященной 15-летию общеобразовательного факультета ТГАСУ «Перспективные материалы и технологии» (г. Томск, 2008 г);
- VIII Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии», г. Томск, 2009);
- Всероссийская конференция «Современная баллистика и смежные вопросы механики» (г. Томск, 2009);
- VI Международной конференции студентов и молодых учёных (г. Томск, 2009).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 233 наименований. Она содержит 52 рисунка, 12 таблиц. Общий объем работы – 170 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, дана краткая характеристика состояния вопроса, сформулирована цель работы, показана ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дано краткое содержание работы.

Отмечено, что построение реалистических физических и математических моделей поведения конструкционных материалов в условиях высокоскоростного удара было бы невозможно без создания динамических методов получения высоких давлений и сжатий, основанных на использовании мощных ударных волн. Эти методы развиты в работах Л.В. Альтшулера, Ф.А. Баумана, А.Н. Дремина, В.Н. Зубарева, Г.И. Канеля, С.Б. Кромера, К.К. Крупникова, Б.Н. Леденева, Мак-Куина, Марша, С.А. Новикова, С.В. Разоренова, М.В. Сеницына, К.П. Станюковича, Р.Ф. Трунина, Уолша, А.В. Уткина, В.Е. Фортова, Христиана, Б.И. Шехтера и других.

Указывается, что наиболее слабым звеном при физической и математической формулировках моделей процесса высокоскоростного деформирования материалов являются критерии разрушения. Различные аспекты разрушения твердых тел рассмотрены в работах В.Н. Аптукова, Н.Х. Ахмадеева, Н.Н. Белова, Г.М. Бертенева, В.В. Болотина, В.И. Владимирова, А.И. Гулидова, Н.Н. Давенкова, С.Н. Журкова, Г.И. Канеля, В.Н. Кукуджанова, Д. Куррана, П.В. Макарова, Ю.И. Мещерякова, В.С. Никифоровского, А.Н. Орлова, В.В. Панасюка, С.В. Разоренова, А.И. Рузанова, А.И. Слуцкера, Э.Е. Томашевского, В.М. Фомина, В.Е. Фортова, Г.П. Черепанова, Н.Т. Югова и других авторов.

В первой главе выписана замкнутая система уравнений пористой упругопластической среды, позволяющая рассчитывать напряженно-деформированное состояние и разрушение в пластичных и хрупких материалах при ударном и взрывном нагружениях.

Неоднородная пористая среда представлена как двухкомпонентный материал, состоящий из твердой фазы – матрицы и включений – пор. Предполагается, что форма пор близка к сферической, а функция их распределения по размерам такова, что они могут быть охарактеризованы некоторым общим для всего ансамбля характерным размером a_0 . Удельный объем пористой среды ν представляется в виде суммы удельного объема материала матрицы ν_m , удельного объема пор ν_p и удельного объема ν_t , образующегося при раскрытии трещин: $\nu = \nu_m + \nu_p + \nu_t$. Пористость материала характеризуется

относительным объемом пустот $\xi = \xi_p + \xi_t$, либо параметром $\alpha = v/v_m$, которые связаны зависимостью $\alpha = 1/(1-\xi)$. Здесь $\xi_p = v_p/v$, $\xi_t = v_t/v$ – относительные объемы пор и трещин соответственно. Система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV &= 0; \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV = \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS; \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV &= \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u} dS; \quad \mathbf{e} = \frac{\mathbf{s}^J}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}; \quad \mathbf{s} : \mathbf{s} = \frac{2}{3} \sigma_T^2; \\ p &= \frac{1}{\alpha} \left[\frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \rho_0 \gamma_0 \varepsilon \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; V – объем интегрирования; S – его поверхность; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали; ρ – плотность; $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{g} + \mathbf{s}$ – тензор напряжений; \mathbf{s} – его девиатор; p – давление; \mathbf{g} – метрический тензор; \mathbf{u} – вектор скорости; $E = \varepsilon + \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} / 2$ – удельная полная энергия; ε – удельная внутренняя энергия; $\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g})\mathbf{g} / 3$ – девиатор тензора скоростей деформаций; $\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2$ – тензор скоростей деформаций; $\mathbf{s}^J = \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$ – производная девиатора тензора напряжений в смысле Яуманна-Нолла; $\sigma_T = \sigma_S / \alpha$, $\mu = \mu_0 (1 - \xi) \left[1 - (\rho_0 c_0^2 + 12\mu_0) \xi / (9\rho_0 c_0^2 + 8\mu_0) \right]$ – эффективные предел текучести и модуль сдвига (для гранулированной среды $\sigma_T = Y_0 / \alpha + kp$); $\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u}) / 2$ – тензор вихря; $\gamma_0, \rho_0, c_0, \mu_0$ – коэффициент Грюнайтцена, начальная плотность, объемная скорость звука, модуль сдвига материала, σ_S – предел текучести, Y_0, k – коэффициенты сцепления и трения в условии текучести Мора-Кулона, $\eta = 1 - \rho_0 v / \alpha$. Параметр λ исключается с помощью условия текучести.

Для замыкания системы необходимы уравнения, описывающие изменение параметра α при растяжении и сжатии.

При уплотнении изначально пористых пластичных материалов в условиях ударно-волнового нагружения параметр α при условии $p \geq \frac{2\sigma_S}{3\alpha} \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)$ определяется из уравнения:

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} - \frac{2\sigma_s}{3} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 0. \quad (2)$$

Хрупкие материалы содержат большое число концентраторов напряжений – пор, границ зерен, трещин, зарождение разрушения на которых происходит в области упругого деформирования. Микроразрушения в них могут появляться при сжатии под действием девиаторных напряжений, что приводит к падению сопротивления разрушению. Эта стадия деформирования характеризуется процессами образования, роста и слияния микротрещин. Уравнение, описывающее изменения параметра α при растяжении и сжатии на упругой стадии разрушения хрупких материалов имеет вид:

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \frac{3\mu_0 (\alpha - \alpha_0)}{8(1 - \nu) N_0 \alpha_0 R^3 \alpha} = 0. \quad (3)$$

Рост трещин определяется уравнением

$$\dot{R}/R = F_1 + F_2, \quad (4)$$

где $F_1 = (\alpha s_i - s_*)/\eta_1$ при $\alpha s_i > s_*$ и $F_1 = 0$ при $\alpha s_i \leq s_*$; $F_2 = (|\alpha p| - p_*)/\eta_2$ при $p < 0, |\alpha p| > p_*$ и $F_2 = 0$ при $p \geq 0, |\alpha p| \leq p_*$; $p = p_0(1 - R/R_*)$; $s_i = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}$; $s_* = s_{01}(1 - R/R_*)$; $R_* = \beta/\sqrt[3]{N_0}$; R – радиус трещины; $s_{01}, p_0, \eta_1, \eta_2, \beta$ – константы материала, N_0 – число трещин в единице объема, ν – коэффициент Пуассона.

В пластичных материалах при действии растягивающих напряжений происходит рост пор. В этом случае при условии $p \leq -\frac{a_s}{\alpha} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right)$ пористость α определяется из уравнения

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 0. \quad (6)$$

Построение количественной модели слияния микродефектов вплоть до образования микроскопических фрагментов является сложной задачей. Предполагается, что слияние микротрещин в высокопрочной керамике про-

исходит, когда их характерный размер R при постоянной концентрации N_0 достигнет критической величины $R_* = \beta/\sqrt[3]{N_0}$.

В более вязких материалах, чем высокопрочная керамика, условие $R = R_*$ является лишь критерием начала фрагментации поврежденного трещинами материала. Процесс фрагментирования поврежденного трещинами материала и поведение разрушенного материала описывается в рамках модели пористой упругопластической среды. При действии растягивающих напряжений в пластически деформированном материале помимо роста трещин происходит рост пор. В этом случае локальным критерием разрушения поврежденного трещинами материала является условие достижения относительным объемом пустот $\xi = (\alpha - 1)/\alpha$ критического значения ξ^* .

Если поврежденный трещинами материал подвергнуть воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности деформаций e_u^* :

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (7)$$

где T_1 и T_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций.

При растяжении фрагментированный материал описывается как порошок, движение которого происходит в соответствии с уравнениями среды лишенной напряжений. Пористость α в материале определяется из уравнения

$$\gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - S_0 \eta)^2} = 0. \quad (8)$$

Данная модель реализована в пакете программ «РАНЕТ-3», позволяющим проводить решение задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов.

Во втором разделе приведено обобщение описанной выше математической модели деформирования и разрушения твердых тел при ударно-волновом нагружении на металлокерамику на основе диборида титана и карбида бора ($TiB_2 + B_4C$), разработанную в Сибирском физико-техническом институте Томского государственного университета (СФТИ ТГУ).

Проведена верификация математической модели поведения металлокерамики при ударно-волновом нагружении. Металлокерамический ударник соударяется по нормали со скоростью 870 м/с с алюминиевой полубесконеч-

ной плитой. Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных дало различие по глубине кратера – 3%, по входному диаметру кратера – 30% (рис. 1).

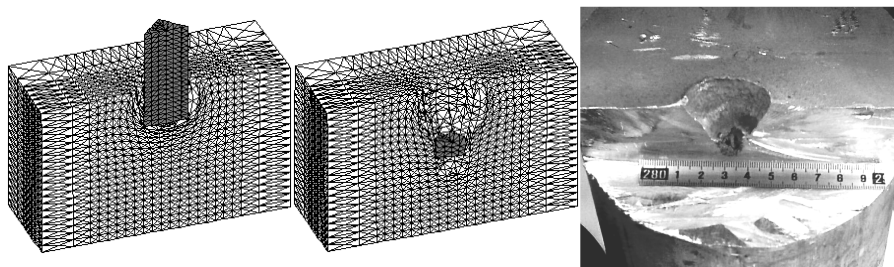


Рис. 1 – Сравнение расчета с экспериментом

Защитные свойства металлокерамики исследовались на примере решения следующей задачи проектирования: необходимо разработать защитную конструкцию, способную противостоять удару стального элемента (СЭ) сферической формы массой 2 г в диапазоне скоростей до 2000 м/с. Защитная конструкция может состоять из различных материалов, но непременно должна содержать стальной лист толщиной 4 мм и по удельному весу не должна значительно превышать эталонную преграду, состоящую из 10 мм дюралюминиевого слоя и 4 мм стальной подложки.

Стальной элемент пробивает эталонную преграду, сохраняя при этом скорость 407 м/с (рис. 2а). При использовании монолитной металлокерамической мишени толщиной 14 мм в первые микросекунды процесса происходит сильная пластическая деформация элемента и его растекание по лицевой поверхности мишени. Металлокерамика разрушается хрупко. При выходе ударного фронта на тыльную поверхность мишени в ней происходит откольное разрушение и образуется сквозное отверстие. После пробития мишени элемент имеет скорость 150 м/с.

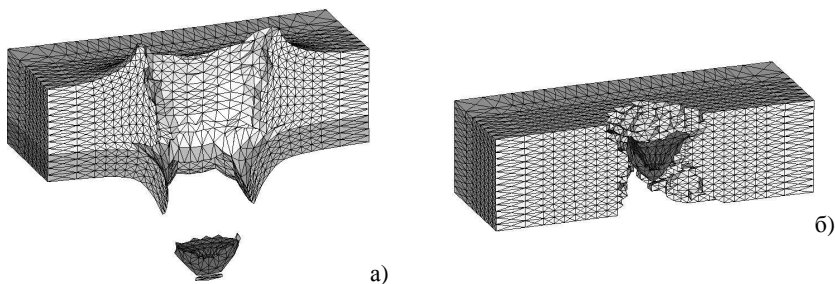


Рис. 2 – Конфигурации на момент окончания расчета стального сферического ударника и преград при соударении со скоростью 2000 м/с

Для устранения откольного эффекта на тыльную поверхность мишени помещалась двухмиллиметровая титановая подложка. Толщина металлокерамического слоя была уменьшена до 10 мм (рис. 3а). На рис. 3б представлена двухслойная мишень, у которой вместо титановой подложки используется стальная толщиной 4 мм. Использование подложки исключает тыльный откол в металлокерамике и заставляет металлокерамический слой работать на сопротивление внедряющемуся элементу. В результате этого СЭ не пробил данные сложные преграды, а застрял в металлокерамическом слое.

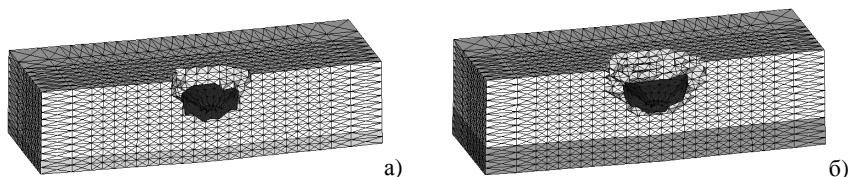


Рис. 3 – Конфигурации на момент окончания расчета стального сферического ударника и преград при соударении со скоростью 2000 м/с

Кроме того, были проведены численные исследования различных конструкций слоистых преград, в состав которых входили металлокерамика, титан и сталь. Рассматриваемые конструкции преград незначительно превышают весовой эквивалент, но для понимания физики происходящих ударно-волновых и деформационных процессов в соударяющихся телах представляют собой большой интерес. Результаты данных исследований представлены в диссертации.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что разработанная на основе диборида титана и карбида бора металлокерамика может быть успешно использована при проектировании защитных конструкций от ударно-волновых воздействий.

В третьем разделе рассмотрен вопрос инициирующего действия цилиндрических стержневых ударников при высокоскоростном наклонном соударении с экранированным ВВ.

Схема рассмотренного типа защитной конструкции заряда ВВ представлена на рис. 4.

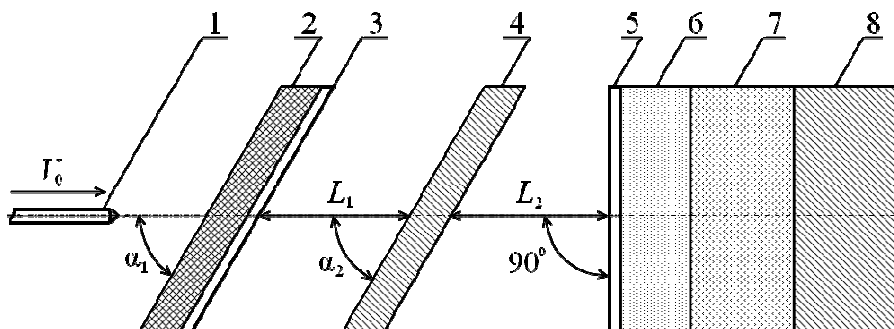


Рис. 4 – Схема взаимодействия стержней с защитной конструкцией:
 1 – ударник; 2 – асботекстолит (10 мм); 3 – Д16Т (3 мм);
 4 – сталь (10 мм); 5 – Д16Т (3 мм); 6 – пенопласт (20 мм);
 7 – модель заряда ВВ (30 мм); 8 – стальное основание (30 мм)

Помещенный на стальное основание толщиной 30 мм заряд PBX-9404 толщиной 30 мм защищен с лицевой стороны трехмиллиметровым дюралюминиевым листом. Пространство между дюралюминиевым листом и зарядом ВВ заполнено слоем из пенопласта толщиной 20 мм. На расстоянии 50 мм от лицевой поверхности дюралюминиевого листа расположен 10 мм стальной экран, за которым на таком же расстоянии находится экран, состоящий из 10 мм асботекстолита и трехмиллиметровой дюралюминиевой подложки. Экраны расположены под некоторыми углами α_i к оси цилиндрического стержня (α_i – угол между осью стержня и лицевой поверхностью i -го экрана).

Стержень представляет собой цилиндрическое тело с конической головной частью. Диаметр стержня $d_0 = 4,5$ мм, длина $L_0 = 105$ мм, высота конической головной части $h = 9$ мм, удлинение $L_0/d_0 = 23,3$.

Для прогнозирования инициирования детонации ВВ PBX-9404 экранированного пространственно-разнесенными оболочками при ударно-волновом нагружении (при $p > p_{\min}$) использовался критерий инициирования детонации в виде:

$$\int_{t_0}^t p^2 dt = K, \quad (9)$$

где K – константа материала, p – давление в ВВ, p_{\min} – минимальное давление, при котором происходит инициирование детонации в ВВ.

Исследовалось влияние скорости взаимодействия стального ударника $m_0 = 12,4 \text{ г}$ с экранированным ВВ на процесс инициирования детонации. Скорость удара варьировалась от 1000 м/с до 6000 м/с, а углы подхода стержней к экранам принимались равными $\alpha_i = 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$.

Методом компьютерного моделирования установлено, что при начальной скорости удара 1000 м/с экранная защита предохраняет заряд ВВ от инициирования детонации.

Увеличение начальной скорости удара до 2000 м/с приводит к ее пробитию и детонации ВВ ($t = 150 \text{ мкс}$) даже при углах подхода $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$ (рис. 5, верх). Результаты расчетов влияния скорости взаимодействия ударника с защитной конструкцией представлены на рис. 5.

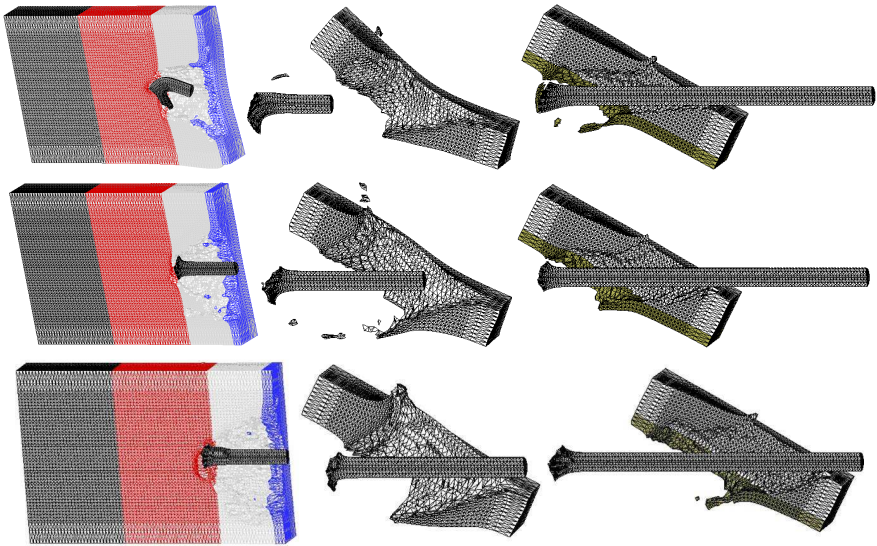


Рис. 5 – Взаимодействие стального ударника с экранной защитой ВВ. Скорость ударника 2000 м/с, 4000 м/с и 6000 м/с. Угол соударения 30°

На первом двухслойном экране стальной стержень теряет ($\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$) от 21% ($V_0 = 6000 \text{ м/с}$) до 25% ($V_0 = 2000 \text{ м/с}$) начальной кинетической энергии. За стальным экраном остаток стержня при $V_0 = 2000 \text{ м/с}$ имеет лишь 16% от величины начальной кинетической энергии, а при $V_0 = 6000 \text{ м/с}$ – 40%. На момент инициирования детонации при начальной скорости удара $V_0 = 2000 \text{ м/с}$ остаток стального стержня сохранил 8,8% первоначальной ки-

нетической энергии, а при $V_0 = 6000$ м/с он обладает в трие большей (28,6%) кинетической энергией.

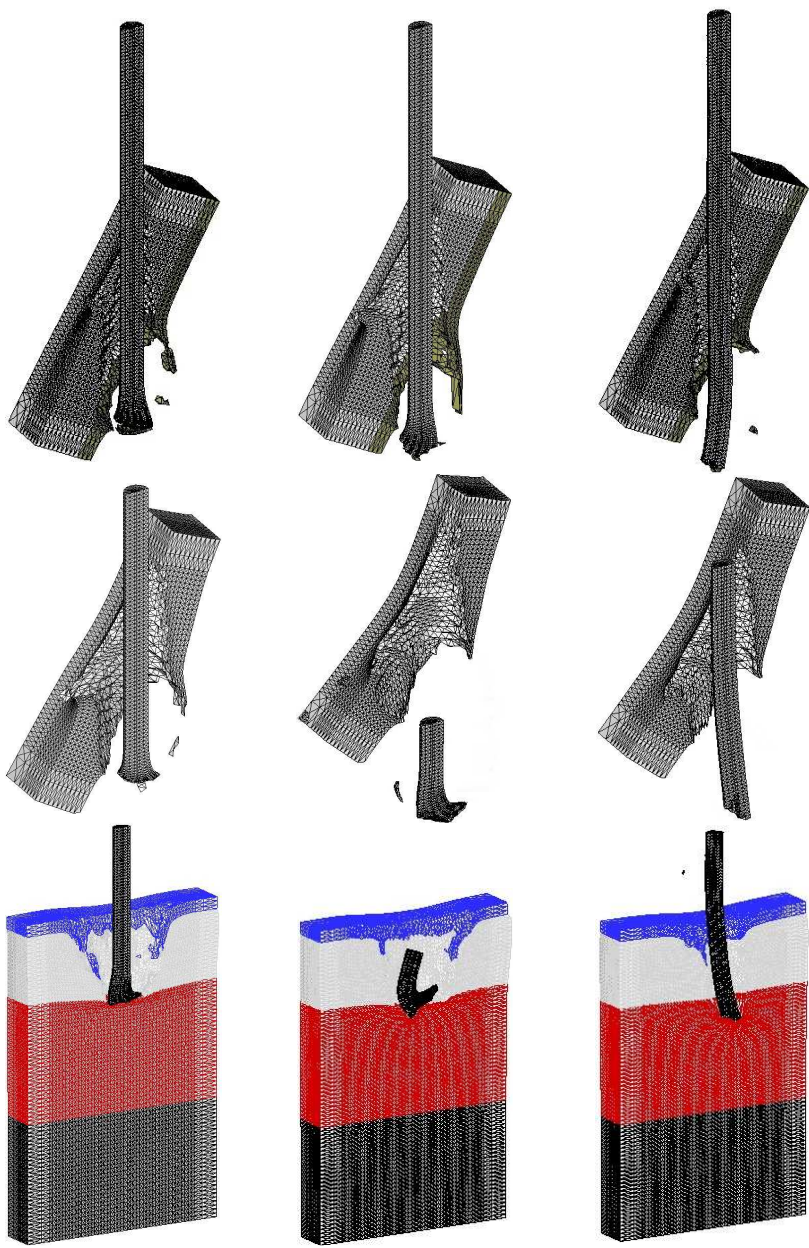
При скорости удара $V_0 = 2000$ м/с и углах подхода $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$ исследовалось влияние материала стержня на процесс пробития защитной конструкции и инициирования детонации в ВВ. Стержни при одинаковой геометрии обладают различной массой, следовательно, при одинаковой скорости удара, и различной кинетической энергией. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 6.

Таблица 1 – Результаты расчетов ударного взаимодействия стержней из различных материалов с экранированным ВВ со скоростью 2000 м/с и углах подхода $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$

	Параметры после 1-ой преграды				Параметры после 2-ой преграды				Параметры на момент детонации ВВ			
	V/V_0	L/L_0	m/m_0	λ_1	V/V_0	L/L_0	m/m_0	λ_1	V/V_0	L/L_0	m/m_0	λ_1
1	0,97	0,80	0,91	1,858	0,93	0,47	0,58	1,089	0,91	0,42	0,54	0,972
2	0,94	0,73	0,85	0,752	0,72	0,20	0,31	0,16	0,59	0,13	0,25	0,088
3	0,93	0,90	0,96	0,602	0,55	0,49	0,59	0,1292	0,55	0,44	0,52	0,093

Примечание: 1 – ударник из сплава вольфрам-никель-железо (ВНЖ) ($m_0 = 26,9$ г), 2 – ударник из стали ($m_0 = 12,4$ г), 3 – ударник из металлокерамики на основе диборида титана и железа (TiB_2+Fe) с равными массовыми долями ($m_0 = 9,0$ г).

На втором экране происходят наибольшие потери ударников по массе и длине. Наибольшее срабатывание отмечается у стального ударника. Минимальное падение скорости на третьей преграде у металлокерамического ударника и ударника из ВНЖ. Это связано с тем, что у стального ударника происходит сильная деформация головной части. У металлокерамического ударника из-за высоких прочностных характеристик на момент удара по дюралюминиевому слою головная часть получилась скошенной (заостренной).



ВНЖ, $m_0 = 26,9$ г

сталь, $m_0 = 12,4$ г

металлокерамика, $m_0 = 9$ г

Рис. 6 – Взаимодействие ударников с защитной конструкцией. Скорость ударника 2000 м/с , угол соударения 30°

В табл. 1 параметр λ_1 обозначает отношение кинетической энергии стержней из рассмотренных материалов в запреградном пространстве к начальной кинетической энергии стального стержня. Остаток стержня из ВНЖ на момент инициирования обладает кинетической энергией на порядок выше, чем остатки стержней из стали и металлокерамики. Проведенный анализ показывает, что металлокерамический стержень с используемыми в расчетах прочностными характеристиками производит на процесс инициирования детонации в данном экранированном ВВ такое же действие, как и стальной стержень, несмотря на то, что его масса на 25% меньше, и, следовательно, он обладал меньшей на момент удара кинетической энергией.

Из анализа результатов вытекает неоспоримое на первый взгляд предположение, что лучшим с точки зрения поражения рассматриваемой защитной конструкции ВВ может служить составной стержень, головная часть которого выполнена из высокопрочной металлокерамики, а хвостовая из стали.

Для проверки этого предположения было рассмотрено ударное взаимодействие составных стержней четырех типов с двухслойным экраном. Скорость соударения составляла 2000 м/с, угол подхода к экрану 30°.

В отличие от рассмотренной выше геометрии стержней составные стержни длиной $L_0 = 100$ мм имели диаметр $d_0 = 6$ мм. Кроме того, в них отсутствовала коническая головная часть. В расчетах варьировалась длина насадки из металлокерамики на основе диборида титана и железа.

У стержней первого типа высота металлокерамического слоя составляла $1 \div 2$ мм, у второго, третьего и четвертого типов – 10 мм, 30 мм и 50 мм соответственно. Сравнение проводилось с монолитными стержнями того же диаметра и длины из стали и металлокерамики. В процессе внедрения стержней второго, третьего и четвертого типов происходит пластическое натекание материала стальной части стержня на металлокерамический насадок, который в области раздела сред находится в упругом состоянии. Этот процесс возникает из-за существенной разности пределов текучести данных материалов. Так, предел текучести металлокерамики выше в 4,5 раза, чем у стали, и составляет 4,5 ГПа. В дальнейшем высокопрочный насадок поворачивается относительно основной части стержня и отламывается от него. Пробивные свойства стержня падают.

Анализируя особенности ударного взаимодействия монолитных и составных стержней с двухслойным экраном, можно утверждать, что при наклонном соударении в запреградном пространстве со вторым стальным экраном составные ударники будут ломаться в местах изгиба. Таким образом,

оказывается, что монолитный стальной стержень является наиболее эффективным с точки зрения поражения конструкции, чем составные.

Проведено исследование защитной конструкции второго типа, в которой стальной экран заменен эквивалентным по массе трехслойным экраном. С лицевой стороны экрана расположен пятимиллиметровый дюралюминиевый лист, за которым находится свинцовый слой толщиной 5 мм. Подложка выполнена из восьмимиллиметрового листа ПММА (оргстекло). Как показывают данные математического моделирования при скорости удара 1000 м/с и углах подхода к первому и второму экранам $\alpha_i = 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ происходит инициирование детонации в ВВ.

В табл. 2 представлены результаты математического моделирования процессов ударного взаимодействия стального стержня с защитной конструкцией второго типа для скоростей удара 750 м/с и 500 м/с.

При скорости удара 750 м/с и углах встречи от 45° до 90° стержень поражает защитную конструкцию. ВВ детонирует.

Как показывают расчеты, $V_0 = 500$ м/с является предельной скоростью поражения стальным стержнем экранной защиты второго типа. При углах подхода $\alpha_i = 90^\circ$ еще происходит детонирование ВВ согласно выбранному критерию. При углах встречи $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ происходит пробитие первого двухслойного экрана и рикошет стержня при взаимодействии с трехслойным экраном.

Таблица 3 – Результаты расчета ударного взаимодействия стального стержня с защитной конструкцией ВВ второго типа

Скорость	Преграда	Угол встречи $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$			Угол встречи $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$			Угол встречи $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$		
		m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0
750 м с	1	0,86	0,87	0,95	0,92	0,96	0,97	0,94	0,97	0,98
	2	Застрыл во второй преграде			0,72	0,69	0,86	0,72	0,82	0,91
	3	Нет детонации			0,48	0,43	0,85	0,69	0,79	0,88
500 м с	1				0,868	0,975	0,976	0,918	0,993	0,984
	2				Рикошет			0,682	0,869	0,943
	3				Нет детонации			0,556	0,857	0,927
								Детонация ВВ		

На рис. 7 на основе данных компьютерного моделирования в координатах скорость удара V – угол подхода стержня к экрану α построены области инициирования детонации в экранированном по первой и второй схемам ВВ при взаимодействии со стальными стержнями в диапазоне скоростей удара 500–4000 м/с и углах подхода от 30° до 90°. Покрытая одинарной штриховкой область соответствует экранной защите второго типа, двойной – первого типа. Нижняя граница этой области проведена не точно. При промежуточных скоростях удара расчетов не проводилось.

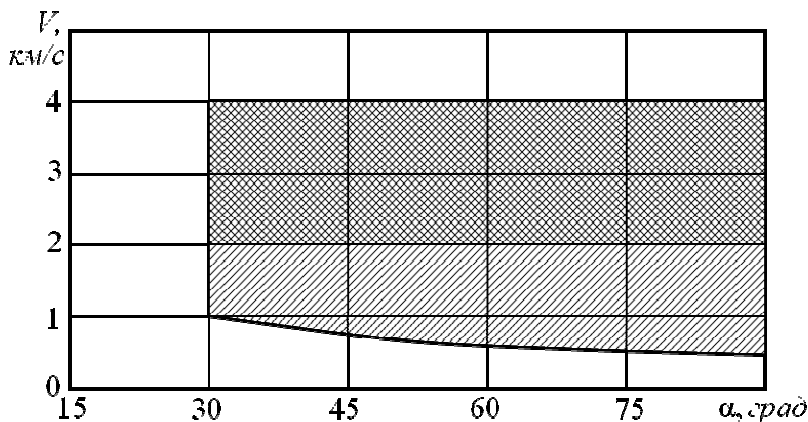


Рис. 7 – Зависимость детонации в экранированном ВВ от скорости V и угла подхода стержня к экрану α .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета и подпрограммы, позволяющие прогнозировать последствия соударения высокоскоростных ударников с защитными конструкциями, содержащими ВВ, при различных начальных условиях взаимодействия, геометрии и физико-механических характеристиках соударяющихся тел.
2. Исследована на удар стального сферического элемента прочность конструкции, содержащей слой металлокерамики на основе диборида титана и карбида бора (TiB_2+V_4C) плотностью 3,5 г/см³. Установлено, что использование слоя из металлокерамики предохраняет защитную конструкцию в диапазоне скоростей удара до 2000 м/с от пробития сферическим стальным ударником массой 2 г.
3. Исследованы особенности соударения стержней из различных материалов с двумя типами эквивалентных по весу защитных конструкций в диапазоне скоростей удара 500–6000 м/с. В защитной конструкции первого типа в

качестве второго экрана используется стальной лист, в защитной конструкции второго типа стальной лист заменен эквивалентным по весу трехслойным экраном, состоящим из дюралюминиевого листа, свинцового слоя и подложки из полиметилметакрилата. Показано, что с точки зрения защиты наиболее эффективна конструкция первого типа.

4. Проведен анализ особенностей ударного взаимодействия монолитных и составных стержней из стали и металлокерамики, на основе диборида титана и железа (TiB_2+Fe), с двухслойным экраном из асботекстолита и дюралюминия. Установлено, что при наклонном ударном взаимодействии с системой пространственно-разнесенных экранов составные ударники менее эффективны, чем монолитные.

5. Получена зависимость детонации защищенного системой пространственно-разнесенных многослойных экранов ВВ РВХ-9404 от скорости стальных стержневых ударников и углов их подхода.

6. Материалы диссертационных исследований доведены до практического использования, что подтверждено документально.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК:

1. Исследование защитных свойств металлокерамических материалов комбинированного строения при высокоскоростном соударении / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Изв. выс. учеб. заведений. Физика, 2008. – Т.51, №7. – С.12-19. {личный вклад автора 60% }

2. Исследование методом компьютерного моделирования защитных свойств конструкций, содержащих слой металлокерамики / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Вестник ТГАСУ, 2008. – №2. – С.105-112. {личный вклад автора 40% }

3. Прогнозирование последствий высокоскоростного соударения цилиндрических стержней с пространственно-разнесенными оболочками, экранирующими взрывчатое вещество (ВВ) / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций, 2009. – Т.15. №1. – С. 94-105. {личный вклад автора 70% }

4. Исследование методом компьютерного моделирования прочностных свойств металлокерамики на основе диборида титана при ударно-волновом нагружении / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Вестник ТГУ. Математика и механика, 2009. – №3(7). – С. 68-80. {личный вклад автора 30% }

5. Математическое моделирование поведения материалов и элементов конструкций в условиях неоднократных ударных нагрузок / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Изв. выс. учеб. заведений. Физика, 2010. – Т. 53. №1. – С.82-89. {личный вклад автора 20%}
6. Исследование особенностей ударного взаимодействия длинных стержней с пространственно-разнесенными защитными конструкциями / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Вестник ТГУ. Математика и механика, 2010. – №3(11). – С. 77-87. {личный вклад автора 60%}

Статьи в журналах:

7. Исследование прочности защитных конструкций взрывчатого вещества на высокоскоростной удар длинными стержнями / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Успехи механики сплошных сред: к 70-летию академика В.А.Левина: Сб. научн. трудов. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – С. 77.
8. Исследование особенностей деформирования длинных стержней при наклонном соударении с конструкцией из пространственно-разнесенных преград / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2008. – №3. – С.123-134.
9. Исследование прочности экранной защитной конструкции на высокоскоростной удар длинным стержнем / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2009. – №3. – С. 70-82.

Статьи в материалах конференций:

10. **Архипов И.Н.** Исследование прочности экранной защитной конструкции на высокоскоростной удар длинным стержнем // Перспективы развития фундаментальных наук: труды VI Международной конференции студентов и молодых ученых. Россия, Томск, 26-29 мая 2009 г./ под ред. Г.А. Вороновой; ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 800-803.
11. Компьютерное моделирование поведения металлокерамических материалов на основе диборида титана в условиях высокоскоростного удара / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Перспективные материалы и технологии. Труды региональной научно-технической конференции, посвященной 15-летию Общеобразовательного факультета ТГАСУ. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2009. – С.248-257.
12. Численное исследование свойств ударников и преград из металлокерамических материалов при высокоскоростном соударении / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы: Сборник материалов конференции. – Томск: ТГУ, 2008. – С. 195-196.

13. Исследование прочностных свойств металлокерамики на основе диборида титана в составе ударников и преград/ Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии. Материалы 8-й Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – С. 19-20.

14. Математическое моделирование поведения конструкционных материалов и изделий из них в условиях неоднократных ударных нагрузок / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии. Материалы 8-й Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых.- Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – С. 20-21.

15. Исследование поведения длинных стержней при ударном взаимодействии с экранированным взрывчатым веществом / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Современная баллистика и смежные вопросы механики. Материалы Всероссийской конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – С. 183-184.

Тезисы:

16. Исследование поведения металлокерамики на основе диборида титана при ударно-волновом нагружении / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова. Тезисы докладов. Владивосток, 2008. – С.184-185.

17. Исследование защитных свойств конструкций, содержащих слой металлокерамики комбинированного строения, на ударные нагрузки / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 130-летию Томского государственного университета и 60-летию механико-математического факультета. Сборник тезисов (Томск, 22-25 сентября 2008 г.) –Томск: ТГУ, 2008. – С.256.

18. Особенности ударного взаимодействия стержней из различных материалов со взрывчатым веществом, экранированным пространственно-разнесенными многослойными преградами / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, **И.Н. Архипов** [и др.] // Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 130-летию Томского государственного университета и 60-летию механико-математического факультета. Сборник тезисов (Томск, 22-25 сентября 2008 г.) – Томск: ТГУ, 2008. – С.257.