

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физико-технический факультет



Ю.Н. Рыжих

06 \_\_\_\_\_ 20 22 г.

Рабочая программа дисциплины

**Численное моделирование высокоскоростных ударных явлений**

по направлению подготовки

**15.04.03 Прикладная механика**

Направленность (профиль) подготовки :

**Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема

**2022**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.05

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПОП

\_\_\_\_\_ В.А. Скрипняк

Председатель УМК

\_\_\_\_\_ В.А. Скрипняк

Томск – 2022

## 1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ОПК-11 – Способен определять направления перспективных исследований в области прикладной механики с учетом мировых тенденций развития науки, техники и технологий;

– ОПК-12 – Способен создавать алгоритмы цифровой обработки баз данных результатов испытаний и эксплуатации сложных деталей и узлов в машиностроении, разрабатывать современные цифровые программы расчетов и проектирования деталей, узлов, конструкций, машин и материалов с учетом требований надежности, долговечности и безопасности их эксплуатации;

– ПК-1 – Способен критически анализировать современные проблемы прикладной механики с учетом потребностей промышленности, современных достижений науки и мировых тенденций развития техники и технологий, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения теоретических, прикладных и экспериментальных задач, анализировать, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты;

– ПК-2 – Способен самостоятельно выполнять научные исследования в области прикладной механики, решать сложные научно-технические задачи, которые для своего изучения требуют разработки и применения математических и компьютерных моделей, применения программных систем мультидисциплинарного анализа (CAE-систем мирового уровня).

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 11.1 Знать основные подходы к определению направлений перспективных исследований в области прикладной механики с учетом мировых тенденций развития науки, техники и технологий.

ИОПК 11.2 Уметь анализировать направления перспективных исследований в области прикладной механики с учетом мировых тенденций развития науки, техники и технологий.

ИОПК 11.3 Владеть методиками анализа и определения направлений перспективных исследований в области прикладной механики с учетом мировых тенденций развития науки, техники и технологий.

ИОПК 12.1 Знать способы построения алгоритмов цифровой обработки баз данных результатов испытаний и эксплуатации сложных деталей и узлов в машиностроении, разработки современных цифровых программ расчетов и проектирования деталей, узлов, конструкций, машин и материалов с учетом требований надежности, долговечности и безопасности их эксплуатации.

ИОПК 12.2 Уметь создавать алгоритмы цифровой обработки баз данных результатов испытаний и эксплуатации сложных деталей и узлов в машиностроении, разрабатывать современные цифровые программы расчетов и проектирования деталей, узлов, конструкций, машин и материалов с учетом требований надежности, долговечности и безопасности их эксплуатации.

ИОПК 12.3 Владеть методиками построения алгоритмов цифровой обработки баз данных результатов испытаний и эксплуатации сложных деталей и узлов в машиностроении, разработки современных цифровых программ расчетов и проектирования деталей, узлов, конструкций, машин и материалов с учетом требований надежности, долговечности и безопасности их эксплуатации.

ИПК 1.1 Знать перспективные направления и последние достижения современной науки и техники в области производства объемных материалов, соединений, композитов на их основе и изделий из них.

ИПК 1.2 Знать современные проблемы прикладной механики, методы планирования научно-исследовательской работы, способы решения научных задач механики, обработки и анализа полученных данных, представления результатов.

ИПК 1.3 Уметь осуществлять сбор, анализ и систематизацию информации по проблеме исследования с учетом потребностей промышленности, современных достижений науки и мировых тенденций развития техники и технологий.

ИПК 1.4 Уметь ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения теоретических, прикладных и экспериментальных задач.

ИПК 1.5 Уметь анализировать, интерпретировать, оценивать, представлять результаты собственных исследований в профессиональном сообществе и защищать результаты выполненного исследования с обоснованными выводами и рекомендациями.

ИПК 2.1 Знать: математические и компьютерные модели, программные системы мультидисциплинарного анализа (CAE-системы мирового уровня), используемые для решения поставленных научно-технических задач.

ИПК 2.2 Уметь самостоятельно выполнять научные исследования в области прикладной механики, решать сложные научно-технические задачи, которые для своего изучения требуют разработки и применения математических и компьютерных моделей, применения программных систем мультидисциплинарного анализа (CAE-систем мирового уровня).

ИПК 2.3 Владеть навыками самостоятельного выполнения научных исследований в области прикладной механики, решения сложных научно-технических задач.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить принципы и методы создания и функционирования защитных конструкций различного назначения, физические основы прочности материалов и конструкций, физические основы процессов, определяющих влияние конструктивных и технологических факторов, а также внешних воздействий на прочность и долговечность элементов защитных конструкций и систем.

– Научиться применять численные методы анализа процессов высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел для решения практических задач прикладной механики.

## **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, является обязательной для изучения.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Третий семестр, экзамен

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг; Конструкционная прочность и ее физические основы.

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 з.е., 180 часов, из которых:

-лекции: 10 ч.

-практические занятия: 20 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

Тема 1. Введение.

Актуальность исследований деформирования и разрушения преград различного типа при высокоскоростном взаимодействии с ними ударника и группы тел методами численного моделирования. Особенности создания численных методик для исследования и прогнозирования разрушения преград с учетом взаимного влияния группы тел при ударе. Цель и задачи изучения дисциплины.

Тема 2. Система основных уравнений и соотношения метода конечных элементов для численного решения проблем высокоскоростного удара. Задача Тейлора.

Система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом разрушения и тепловых эффектов. Конечно-разностные соотношения метода конечных элементов для численного решения пространственных задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел. Трехмерный расчет взаимодействия цилиндрических тел с жесткой стенкой.

Тема 3. Имитационная модель разрушения эрозионного типа в задачах высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел.

Проникание удлиненных ударников в массивные преграды. Влияние форм ударника и его прочностных характеристик на проникание в пластину и разрушение. Влияние тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробивания пластины из фторполимера. Высокоскоростное ортогональное резание металлов инструментом из СТМ с учетом разрушения и температурных эффектов.

Тема 4. Разрушение керамических преград при взаимодействии с ударником и группой тел в диапазоне скоростей встречи 100 - 4000 м/с.

Моделирование поведения керамических преград на основе оксида алюминия в широком диапазоне скоростей нагружения. Формирование устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения. Особенности разрушения керамических преград конечной толщины стальными ударниками в диапазоне скоростей удара 600 - 4000 м/с. Разрушение керамической пластины при последовательном нагружении группой из двух идентичных тел.

Тема 5. Удар под углом группы из двух частиц по преграде конечной толщины.

Синхронный удар двух частиц по пластине при углах подхода обеих частиц  $15^{\circ}$  и  $30^{\circ}$ . Синхронное контактирование с пластиной двух сходящихся частиц при углах подхода обеих частиц  $15^{\circ}$  и  $30^{\circ}$ . Синхронное взаимодействие двух частиц с пластиной при движении обеих частиц под углом  $60^{\circ}$  в одном направлении. Разновременный удар двух частиц, движущихся под углом  $60^{\circ}$  в одном направлении. Разновременный удар двух сходящихся частиц.

Тема 6. Численное моделирование в трехмерной постановке удара группы высокоскоростных частиц по преграде.

Моделирование процессов соударения высокоскоростных частиц с преградами различных типов. Синхронный удар группы высокоскоростных частиц по нормали к преграде. Взаимодействие группы частиц с преградой при ударе под углом.

Тема 7. Современные программные пакеты для визуализации результатов численных расчетов.

Система подготовки данных для графического пакета Tecplot. Понятие и управление фреймами и рабочим пространством. Построение графиков функций, управление осями координат, изменение параметров кривой, надписи, аппроксимация в виде функции, перенос готового графика в презентации. Работа с двумерными массивами данных, построение расчетных сеток, полей и изолиний параметров процесса. Работа с трехмерными массивами данных. Возможности Tecplot при создании анимаций.

### **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

### **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

**Экзамен в третьем семестре** проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть представляет собой тест из 7 вопросов, проверяющих ИОПК-1.1, ИОПК-12.1, ИПК – 1.1, ИПК-1.2. Ответы на вопросы первой части даются путем выбора из списка предложенных.

Вторая часть содержит один теоретический вопрос, проверяющий ИОПК-11.2, ИОПК-12.2, ИПК – 1.2, ИПК-1.3, ИПК-2.2. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Третья часть проверяет ИОПК-11.3, ИОПК – 12.3, ИПК – 1.4, ИПК – 1.5, ИПК – 2.3 и представляет собой численное решение практической задачи. Темы практических задач распределяются заранее, не менее чем за 2 месяца до проведения экзамена. Ответом на вопросы третьей части предполагается представление результатов решения задачи и краткая их интерпретация с описанием динамики процесса деформирования и разрушения материала взаимодействующих тел.

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом разрушения и тепловых эффектов.
2. Конечно-разностные соотношения метода конечных элементов для численного решения пространственных задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел.
3. Задача Тейлора.
4. Имитационная модель разрушения эрозионного типа в задачах высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел.
5. Проникание удлиненных ударников в массивные преграды.
6. Влияние форм ударника и его прочностных характеристик на проникание в пластину и разрушение.
7. Влияние тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробивания пластины из фторполимера.
8. Высокоскоростное ортогональное резание металлов инструментом из СТМ с учетом разрушения и температурных эффектов.
9. Моделирование поведения керамических преград на основе оксида алюминия в широком диапазоне скоростей нагружения.
10. Формирование устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения.

11. Особенности разрушения керамических преград конечной толщины стальными ударниками в диапазоне скоростей удара 600 - 4000 м/с.
12. Разрушение керамической пластины при последовательном нагружении группой из двух идентичных тел.
13. Синхронный удар двух частиц по пластине при углах подхода обеих частиц  $15^{\circ}$  и  $30^{\circ}$ .
14. Синхронное контактирование с пластиной двух сходящихся частиц при углах подхода обеих частиц  $15^{\circ}$  и  $30^{\circ}$ .
15. Синхронное взаимодействие двух частиц с пластиной при движении обеих частиц под углом  $60^{\circ}$  в одном направлении.
16. Разновременный удар двух частиц, движущихся под углом  $60^{\circ}$  в одном направлении.
17. Разновременный удар двух сходящихся частиц.
18. Моделирование процессов соударения высокоскоростных частиц с преградами различных типов в трехмерной постановке.
19. Синхронный удар группы высокоскоростных частиц по нормали к преграде в трехмерной постановке.
20. Взаимодействие группы частиц с преградой при ударе под углом в трехмерной постановке.
21. Система подготовки данных для графического пакета Tecplot.
22. Понятие и управление фреймами и рабочим пространством в Tecplot.
23. Построение графиков функций, управление осями координат, изменение параметров кривой, надписи, аппроксимация в виде функции, перенос готового графика в презентации в Tecplot.
24. Работа с двумерными массивами данных, построение расчетных сеток, полей и изолиний параметров процесса в Tecplot.
25. Работа с трехмерными массивами данных в Tecplot.
26. Возможности Tecplot при создании анимаций.

Темы практических задач:

1. Сталь/алюминий: соударение ударника из стали с преградой (пластиной) из алюминиевого сплава.
2. Алюминий/сталь: соударение ударника из алюминиевого сплава с преградой (пластиной) из стали.
3. Вольфрамовый сплав/сталь, глубокое проникание: удлиненный ударник из вольфрамового сплава внедряется в массивную преграду из стали.
4. Сталь/керамика: соударение ударника из стали с преградой из высокопрочной керамики.
5. Алюминий/полимер: соударение ударника из алюминиевого сплава с преградой (пластиной) из полимера.
6. Сталь/сталь, разнесенные преграды: соударение ударника из стали с преградой из двух стальных пластин.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

При промежуточной аттестации учитываются результаты текущего контроля (посещаемость, выполнение контрольных работ, тестов по лекционному материалу, домашних заданий), результат «аттестован» соответствует полному выполнению всех предложенных заданий, «не аттестован» - в противном случае.

Оценка «отлично» за экзамен предполагает успешную промежуточную аттестацию, полные ответы на теоретические вопросы и успешное выполнение практического задания.

Оценка «неудовлетворительно» за экзамен ставится в случае промежуточной не аттестации и отсутствия ответов на экзаменационные вопросы и решения практического задания.

Оценки «хорошо» и «удовлетворительно» предполагают успешную промежуточную аттестацию, а также в соответствующей степени неполные ответы на вопросы и недостаточно успешное решение практического задания.

## **11. Учебно-методическое обеспечение**

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <http://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22430>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) Методические указания по выполнению практических заданий.

## **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

а) основная литература:

– Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, переработанное. - В 2 т. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 1488 с.

– Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1, 2. - М.: Наука, 1973. - 1112 с.

– Ионов В.Н., Огибалов П.М. Прочность пространственных элементов конструкций. Ч. 1. Основы механики сплошной среды. - М.: Высшая школа, 1979. - 384 с.

– Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Разоренов С.В. Ударные волны в конденсированных средах. Томск. Изд-во НТЛ, 2007. – 168 с.

– Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. - 568 с.

– Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. - М: Мир, 1967. - С. 212 - 263.

– Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999. – 266 p.

б) дополнительная литература:

– Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 784 с.

– Динамика удара / Под ред. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. -М.: Мир, 1985. -286 с.

– Селиванов В.В., Новиков С.А., Кобылкин И.Ф. Взрывные технологии. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008. – 648 с.

– Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. - 600 с.

– Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортгов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. –М.: Янус-Ю. 1996. – 409 с.

– Johnson G.R. Numerical algorithms and material models for high-velocity impact computations / International Journal of Impact Engineering 38 (2011) 456-472.

в) ресурсы сети Интернет:

– открытые онлайн-курсы

– <http://strelka.ftf2.tsu.ru/school/>

## **13. Перечень информационных технологий**

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standard 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –  
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате («Актру»).

#### **15. Информация о разработчиках**

Автор: Зелепугин Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, ст.н.с., кафедра механики деформируемого твёрдого тела, профессор.