



УНИВЕРСИТЕТ
ПОБАЧЕВСКОГО

ЛЕКЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ШКОЛЫ

«КОМПЬЮТЕРНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА»

П. В. СМИРНОВ, Д. В. КАПИТАНОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЯЗУ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ
ЗАПРОЕКТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Национальный исследовательский

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**ЛЕКЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ШКОЛЫ
«Компьютерная и экспериментальная механика»**

Л.В. Смирнов, Д.В. Капитанов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЯЭУ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ
ЗАПРОЕКТНЫХ И АВАРИЙНЫХ
ПРОЦЕССОВ**

Нижний Новгород
2018

УДК 539.3
ББК 22.2
С50

С50 Смирнов Л.В., Капитанов Д.В. Математическое моделирование динамики ЯЭУ при проектировании и анализе запроектных и аварийных процессов – Н. Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2018. – 110 с.

Представлен обзор основных результатов проведенных в Нижегородском государственном университете исследований динамики запроектных и аварийных процессов в ядерных энергетических установках. Кратко изложены общие соображения о значении и методике исследований. Широко использован метод разделения быстрых и медленных процессов, представлена история развития этого метода.

Первая глава обзора посвящена демонстрации методики и результатов аналитических исследований динамики физических процессов при делении ядерного горючего в активной зоне реактора. Показана возможность использования управляемых медленных процессов реакции деления как основа работы ядерных энергетических реакторов. Приведены результаты анализа физических свойств и особенностей конструкции ядерного реактора РМБК, а также действий операторов, проводивших эксперимент на четвертом блоке Чернобыльской АЭС. Совокупность этих факторов привела к потере устойчивости по быстрым процессам и как следствие – к аварии с разрушением реактора.

Во второй главе приведены результаты аналитических и проведенных с использованием компьютера численных исследований гидродинамических и гидроупругих процессов в обеспечивающих тепломассоперенос системах циркуляции теплоносителя.

Предназначено для аспирантов и магистров, а также для преподавателей вузов и научных работников.

Обзор выполнен при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

Серия
ЛЕКЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ШКОЛЫ
«Компьютерная и экспериментальная механика»
Ответственный редактор Л.А. Игумнов

УДК 539.3
ББК 22.2

© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

СМИРНОВ Л.В.	5
КАПИТАНОВ Д.В.	7
Введение.....	9
ГЛАВА 1. Математическое моделирование динамики физических процессов при реакции деления ядерного горючего. Исследование причин и начального этапа аварии на Чернобыльской АЭС	15
1.1. Анализ точечной модели нейтронной кинетики.....	16
1.2. Анализ характера и причин аварии на кипящем реакторе РМБК.....	20
1.2.1. Конструкция реактора. Цель и программа эксперимента, вызвавшего аварию.....	21
1.2.2. Математическая модель теплофизических процессов.....	23
1.2.3. Результаты исследования математической модели	26
1.2.4. Анализ начального этапа и причин аварии.....	30
1.3. Особенности динамики реакторов, связанные с кипением теплоносителя	34
ГЛАВА 2. Исследование гидродинамических и гидроупругих процессов в системах тепломассопереноса ЯЭУ	36
2.1. Теоретические основы прикладной аналитической гидромеханики	37
2.2. Вывод и анализ математических моделей динамики гидросистем.....	42
2.3. Исследование динамики систем циркуляции теплоносителя	48
2.3.1. Нахождение и анализ устойчивости стационарных режимов.....	52
2.3.2. Особенности динамики систем циркуляции теплоносителя, содержащих объемы со свободным уровнем....	59
2.3.3. Связь динамических процессов в системе циркуляции теплоносителя с безопасностью ядерной энергетической установки	61
2.3.4. Математическое моделирование взаимодействующих гидродинамических и механических процессов в центробежных насосах	65
2.4. Математическая модель динамики одномерного течения скимаемой жидкости.....	69
2.5. Динамические проблемы, обусловленные взаимодействием гидродинамических и механических процессов в сложных гидросистемах.....	72

2.5.1. Математические модели динамики механической и гидродинамической подсистем.....	73
2.5.2. Динамика криволинейного трубопровода с потоком жидкости	75
2.5.3. Поперечные колебания прямого трубопровода с потоком жидкости.....	77
2.5.4. Колебания пространственного трубопровода при акустических колебаниях в потоке транспортируемой среды....	81
2.5.5. Математическое моделирование автоколебаний управляемого потоком клапана	84
Заключение.....	88
Приложение 1. Основы методики разделения процессов на быстрые и медленные. История разработки этой методики в Горьковском (ныне Нижегородском) государственном университете	91
П.1. Быстрые и медленные процессы. Несущественность малого параметра.....	92
П.2. Разрывные автоколебания	96
Приложение 2. Справка по истории и научной тематике отдела динамики систем НИИ механики ННГУ	98
Приложение 3. Прикладная аналитическая гидромеханика, теоретические основы, результаты и перспективы	101
Список литературы.....	106



**СМИРНОВ
Лев Васильевич**

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшей школы, заслуженный профессор ННГУ, около 60 лет работает в Нижегородском, ранее Горьковском, государственном университете.

Родился 13 сентября 1934 года в г. Горьком. С 1958 года после окончания радиофизического факультета Горьковского университета по специальности физик-исследователь начал работать в Горьковском физико-техническом институте и прошел путь от должности младшего научного сотрудника до главного научного сотрудника. Основные направления научной деятельности Л.В. Смирнова – воспитанника основанной академиком А.А. Андроновым школы нелинейных колебаний: динамика систем, прикладная гидромеханика, аэрогидроупругость, динамика и безопасность ядерных энергетических установок.

В связи с закрытостью работ в области ядерной энергетики защита кандидатской диссертации по спецтематике состоялась в Московском инженерно-физическом институте в 1969 году. Первая открытая публикация Л.В. Смирнова появилась уже после защиты, однако результаты кандидатской работы вошли составной частью в книгу начальника главка Минсредмаша Н.М. Синева, который написал отзыв на автореферат диссертации.

Докторская диссертация «Математическое моделирование гидромеханических процессов в системах циркуляции теплоносителя ЯЭУ» (по

изданной в Атомэнергоиздате монографии) защищена в 1993 году в Нижегородском техническом университете.

С 1969 года после защиты кандидатской диссертации Л.В. Смирнов занимается преподавательской деятельностью на механико-математическом факультете ННГУ сначала в должности старшего преподавателя и доцента по совместительству, а с 1994 года в должности профессора кафедры теоретической механики. Им подготовлено восемь общих и специальных курсов лекций, это «Колебания распределенных систем», «Прикладная аналитическая гидромеханика», «Динамика гидроупругих систем», «Теория устойчивости и управления» и другие.

Л.В. Смирнов лично и в соавторстве опубликовал более 150 работ, в том числе 3 монографии. Под его руководством защищены семь кандидатских и две докторских диссертации.

В течении долгих лет он был членом экспертной группы «Динамика, физика и теплогидравлика ЯЭУ и АЭС» секции № 1 госкорпорации Росатом и заместителем главного редактора сборника «Вопросы атомной науки и техники», серия «Физика ядерных реакторов. Динамика и безопасность ЯЭУ» и членом двух диссертационных советов в ННГУ и ОКБМ «Африкантов».



КАПИТАНОВ
Денис Владимирович

Кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Института информационных технологий, математики и механики, научный сотрудник НИИМ Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (ННГУ).

Родился 8 февраля 1984 года в г. Горьком. В 2007 году окончил магистратуру по кафедре «Теоретическая механика» механико-математического факультета ННГУ. С 2007 по 2010 годы проходил обучение на очном отделении аспирантуры при ННГУ. С 2009 по 2013 годы работал в должности ассистента кафедры «Теоретическая механика» механико-математического факультета, в настоящее время является ассистентом кафедры «Теоретическая, компьютерная и экспериментальная механика» Института информационных технологий, математики и механики ННГУ. В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», тема диссертационной работы «Динамика и устойчивость нагруженных стержней и трубопроводов с движущейся жидкостью». Принимает активное участие в коллекционных исследованиях и работах по грантам.