

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Физика сложных систем
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем физики и астрофизики
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Г. Семенов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем физики и астрофизики 27.05.2020

Аннотация

Курс предназначен для студентов четвертого курса МФТИ и имеет своей целью ознакомление студентов с задачами и методами современной физики сложных систем. Это позволит им в будущем применять полученные ранее знания в области теоретической и математической физики к описанию сложных систем, возникающих в смежных областях науки, таких как биология, химия, экономика, социология и др. Целью дисциплины является формирование знаний и умений, необходимых для проведения междисциплинарных исследований с использованием методов современной теоретической физики, построения моделей сложных систем и их анализа.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

ознакомление студентов с задачами и методами современной физики сложных систем. Это позволит им в будущем применять полученные ранее знания в области теоретической и математической физики к описанию сложных систем, возникающих в смежных областях науки, таких как биология, химия, экономика, социология и др.. Целью дисциплины является формирование знаний и умений, необходимых для проведения междисциплинарных исследований с использованием методов современной теоретической физики, построения моделей сложных систем и их анализа.

Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся знаний о современных задачах междисциплинарных исследований;
- обучение студентов методам физики сложных систем;
- формирование умений и навыков применять полученные знания для решения задач в смежных областях науки, таких как биология, химия, экономика, социология и др.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- Основные задачи из физики сложных систем, биологии, экономики и других областей, к которым применяются методы теоретической и математической физики;
- Основные понятия курса: эргодичность, масштабная инвариантность, фрактальность, перемежаемость, скейлинг, спиновое стекло, устойчивость систем дифференциальных уравнений, автомодельные решения, гидродинамические неустойчивости, бифуркация;
- Смысл применяемых в курсе методов.

уметь:

- Применять обсуждаемые в рамках курса подходы к решению задач
- Анализировать применимость описанных методов к исследованию задач в смежных с физикой областях науки

владеть:

- Теоретическим и понятийным аппаратом физики сложных систем.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Сложные системы: основные мотивы и понятия	2	1		3
2	Элементы качественной теории динамических систем	2	1		3
3	Пространственно-временные структуры в физических и химических системах	2	1		3
4	Гидродинамические неустойчивости	2	1		3
5	Примеры моделей биологических систем	2	1		3
6	Идеальная жидкость	2	1		3
7	Вязкая жидкость	2	1		3
8	Одномерные течения сжимаемого газа	2	1		3
9	Турбулентность и ее возникновение	2	1		3
10	Явление мультифрактальности в турбулентности	2	1		3
11	Методы описания стохастических систем	2	1		3
12	Перемежаемость, скейлинг, аномальный скейлинг	2	1		3
13	Популяционная динамика	2	1		3
14	Методы описания неупорядоченных систем	2	1		3
15	Введение в физику спиновых стекол	2	1		3
Итого часов		30	15		45
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

1. Сложные системы: основные мотивы и понятия

Открытые и закрытые системы, эргодичность и ее нарушение, множественность равновесий. Неравновесная динамика, эффекты старения. Масштабная инвариантность, фрактальность. Возбуждаемая среда, автоволны, диссипативные структуры, автосолитоны.

2. Элементы качественной теории динамических систем

Диссипативные системы. Фазовый портрет, траектория, основные типы бифуркаций на плоскости. Устойчивость, характеристические показатели Ляпунова. Понятие аттрактора. Бифуркации в многомерных системах. Хаос в динамических системах и сценарии (пути) его возникновения. Фрактальные структуры и их размерность.

3. Пространственно-временные структуры в физических и химических системах

Модель Пригожина-Лефевра-Николиса («брюсселятор»). Реакция Белоусова-Жаботинского, модель Филда-Нойса («орегонатор»).

4. Гидродинамические неустойчивости

Эффект Бенара. Представление о типах твердотельных автоволновых сред. Тепловые волны и неоднородные стационарные состояния в системе $Fe+H_2$. Механизм эффекта барретирования.

5. Примеры моделей биологических систем

Морфогенез гидры, модель Гирера-Майнхарда. Механизм формирования окраски шкур животных. Морфогенез насекомых. Роль ионных токов в процессах самоорганизации, явление самоэлектрофореза. Модели механизмов формообразования у бактерий и у слизевика *Dictyostellium discoideum*. «Механические» модели морфогенеза, морфогенез клеточных пластов на ранних стадиях развития зародыша. Модели генетических сетей.

6. Идеальная жидкость

Уравнение непрерывности, Уравнение Эйлера, уравнение Бернулли. Завихренность, сохранение циркуляции, уравнения Кирхгофа. Потенциальные течения, комплексный потенциал.

7. Вязкая жидкость

Тензор энергии-импульса и уравнение движения вязкой жидкости. Течение при малых числах Рейнольдса, формула Стокса. Вязкие течения Хеле-Шоу и проблема лапласовского роста.

8. Одномерные течения сжимаемого газа

Звуковые волны, их энергия и импульс. Образование разрывов в звуковой волне, характеристики, инварианты Римана. Произвольное одномерное движение сжимаемого газа, преобразование годографа.

9. Турбулентность и ее возникновение

Неустойчивость течений и возбуждение турбулентности. Статистическое описание турбулентных течений. Закон Колмогорова, гипотеза Колмогорова. Диссипативная аномалия. Перемежаемость.

10. Явление мультифрактальности в турбулентности

Мультифрактальность как обобщение скейлинга Колмогорова. Модель крупномасштабных пульсаций — течение Бэтчелора.

11. Методы описания стохастических систем

Броуновское движение. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка. Закон Аррениуса. Аномальная диффузия. Continuous time random walk (CTRW) и его приложения.

12. Перемежаемость, скейлинг, аномальный скейлинг

Фундаментальные свойства динамики финансовых рынков. Роль эндогенных и экзогенных факторов. Модель встречных потоков.

13. Популяционная динамика

Динамика инноваций. Пороговые эффекты в динамике эпидемий.

14. Методы описания неупорядоченных систем

Модель случайных энергий. Метод реплик. Связь с задачами кодирования. Модель Изинга в случайном внешнем поле. Применение к задачам социологии и экономики.

15. Введение в физику спиновых стекол

Связь с задачами комбинаторной оптимизации. Неравновесная спиновая динамика. Основные механизмы и численное моделирование. Применение к модели Изинга и случайном внешнем поле.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Для занятий требуется аудитория, оборудованная доской, экраном и проектором.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 6 : Гидродинамика : учеб. пособие для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского . — 5-е изд., стереотип. — 3-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 1986, 1988, 2003, 2006 . — 736 с.
2. Современная гидродинамика : Краткий курс [Текст] = Fluid Mechanics for Physicists Г. Фалькович - М. ; Ижевск Регулярная и хаотическая динамика, 2014
3. Синергетика [Текст] : Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах/Г. Хакен , -М., Мир, 1985
4. Чулищев А.И. Математические методы нелинейной динамики.- М.: Физматлит, 2000.
5. P. L. Krapivsky, S.Redner, E.Ben-Naim, A Kinetic View of Statistical Physics, Cambridge University Press, 2010.
6. M.Mézard and A.Montanari, Information, Physics, and Computation, Oxford University press, 2009.

Дополнительная литература

1. В.Эбелинг. Образование структур при необратимых процессах. М.:Мир, 1979.
2. U. Frisch, Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov, Cambridge University Press, 1995.
3. H. Nishimori, Statistical Physics of Spin Glasses and Information Processing: An Introduction, Clarendon press, 2001.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

www.arXiv.org

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На отдельных лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра проблем физики и астрофизики
курс: 4
квалификация: бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.Г. Семенов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика сложных систем» обучающийся должен:

знать:

- Основные задачи из физики сложных систем, биологии, экономики и других областей, к которым применяются методы теоретической и математической физики;
- Основные понятия курса: эргодичность, масштабная инвариантность, фрактальность, перемежаемость, скейлинг, спиновое стекло, устойчивость систем дифференциальных уравнений, автомодельные решения, гидродинамические неустойчивости, бифуркация;
- Смысл применяемых в курсе методов.

уметь:

- Применять обсуждаемые в рамках курса подходы к решению задач
- Анализировать применимость описанных методов к исследованию задач в смежных с физикой областях науки

владеть:

- Теоретическим и понятийным аппаратом физики сложных систем.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Контрольные вопросы:

- 1) Устойчивость, характеристические показатели Ляпунова. Понятие аттрактора. Бифуркации в многомерных системах.
- 2) Хаос в динамических системах и сценарии (пути) его возникновения.
- 2) Модель Пригожина-Лефевра-Николиса («брюсселятор»). Реакция Белоусова-Жаботинского, модель Филда-Нойса («орегонатор»).

- 3) Эффект Бенара.
- 4) Механизм эффекта барретирования.
- 5) Роль ионных токов в процессах самоорганизации, явление самоэлектрофореза.
- 6) Тензор энергии-импульса и уравнение движения вязкой жидкости. Вязкие течения Хеле-Шоу и проблема лапласовского роста.
- 7) Звуковые волны, их энергия и импульс. Образование разрывов в звуковой волне, характеристики, инварианты Римана.
- 8) Произвольное одномерное движение сжимаемого газа., преобразование годографа.
- 9) Турбулентность и ее возникновение. Закон Колмогорова, гипотеза Колмогорова. Диссипативная аномалия. Переменяемость.
- 10) Явление мультифрактальности в турбулентности.
- 11) Модель крупномасштабных пульсаций — течение Бэтчелора.
- 12) Броуновское движение. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка. Закон Аррениуса.
- 13) Continuous time random walk (CTRW) и его приложения.
- 14) Фундаментальные свойства динамики финансовых рынков. Роль эндогенных и экзогенных факторов.
- 15) Популяционная динамика. Динамика инноваций. Пороговые эффекты в динамике эпидемий.
- 16) Модель Изинга в случайном внешнем поле.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Сложные системы: основные мотивы и понятия

Эргодичность и ее нарушение.

Масштабная инвариантность, фрактальность.

Возбуждаемая среда, автоволны, диссипативные структуры, автосолитоны.

2. Элементы качественной теории динамических систем

Фазовый портрет, траектория, основные типы бифуркаций на плоскости.

Устойчивость, характеристические показатели Ляпунова. Понятие аттрактора.

Хаос в динамических системах и сценарии (пути) его возникновения.

Фрактальные структуры и их размерность.

3. Пространственно-временные структуры в физических и химических системах.

Модель Пригожина-Лефевра-Николиса («брюсселятор»).

Реакция Белоусова-Жаботинского.

Модель Филда-Нойса («орегонатор»).

4. Гидродинамические неустойчивости.

Эффект Бенара.

Представление о типах твердотельных автоволновых сред.

Тепловые волны и неоднородные стационарные состояния в системе Fe+H₂.

5. Примеры моделей биологических систем.

Модель Гирера-Майнхарда.

Морфогенез насекомых. Роль ионных токов в процессах самоорганизации, явление самоэлектрофореза.

Модели механизмов формообразования у бактерий и у слизевика Dictyostellium discoideum.

Модели генетических сетей.

6. Идеальная жидкость.

Уравнение непрерывности, Уравнение Эйлера, уравнение Бернулли.

Завихренность, сохранение циркуляции, уравнения Кирхгофа.

Потенциальные течения, комплексный потенциал.

7. Вязкая жидкость.

Тензор энергии-импульса и уравнение движения вязкой жидкости.

Течение при малых числах Рейнольдса, формула Стокса.

Вязкие течения Хеле-Шоу и проблема лапласовского роста.

8. Одномерные течения сжимаемого газа.

Звуковые волны, их энергия и импульс.

Образование разрывов в звуковой волне, характеристики, инварианты Римана.

Произвольное одномерное движение сжимаемого газа.

9. Турбулентность и ее возникновение.

Неустойчивость течений и возбуждение турбулентности.

Статистическое описание турбулентных течений. Закон Колмогорова, гипотеза Колмогорова.

Диссипативная аномалия. Перемежаемость.

10. Явление мультифрактальности в турбулентности.

Мультифрактальность как обобщение скейлинга Колмогорова.

Модель крупномасштабных пульсаций — течение Бэтчелора.

11. Методы описания стохастических систем.

Броуновское движение. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка. Закон Аррениуса.

Аномальная диффузия.

Continuous time random walk (CTRW) и его приложения.

12. Перемежаемость, скейлинг, аномальный скейлинг.

Фундаментальные свойства динамики финансовых рынков.

Роль эндогенных и экзогенных факторов. Модель встречных потоков.

13. Популяционная динамика.

Динамика инноваций.

Пороговые эффекты в динамике эпидемий.

14. Методы описания неупорядоченных систем.

Модель случайных энергий. Метод реплик.

Связь с задачами кодирования.

Модель Изинга в случайном внешнем поле.

Применение к задачам социологии и экономики.

15. Введение в физику спиновых стекол.

Связь с задачами комбинаторной оптимизации.

Неравновесная спиновая динамика. Основные механизмы и численное моделирование.

Применение к модели Изинга и случайном внешнем поле.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачёт проводится по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.