

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Национальный исследовательский**  
**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

УТВЕРЖДЕНО

решением ученого совета ННГУ

протокол от "30"ноября 2022 г.

№13

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Конструктивная роль шума в нелинейных неравновесных**  
**системах»**

Уровень высшего образования

**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Научные специальности

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика, 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика, 1.1.5. Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение, 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.4.1. Неорганическая химия, 1.4.2. Аналитическая химия, 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия, 1.4.7. Высокомолекулярные соединения, 1.4.8. Химия элементоорганических соединений, 1.5.11. Микробиология, 1.5.15. Экология, 1.5.2. Биофизика, 1.5.21. Физиология и биохимия растений, 1.5.5. Физиология человека и животных, 2.2.2. Электронная компонентная база микро и наноэлектроники, квантовых устройств, 3.2.7. Аллергология и иммунология, 5.1.1. Теоретико-исторические правовые науки, 5.1.2. Публично-правовые (государственно-правовые) науки, 5.1.3. Частно-правовые (цивилистические) науки, 5.1.4. Уголовно-правовые науки, 5.1.5. Международно-правовые науки, 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.4. Финансы, 5.2.6. Менеджмент, 5.3.7. Возрастная психология, 5.4.2. Экономическая социология, 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы, 5.4.6. Социология культуры, 5.4.7. Социология управления, 5.5.2. Политические институты, процессы, технологии, 5.5.4. Международные отношения, глобальные и региональные исследования, 5.6.1. Отечественная история, 5.6.2. Всеобщая история, 5.6.7. История международных отношений и внешней политики, 5.7.1. Онтология и теория познания, 5.8.2. Теория и методика обучения и воспитания, 5.8.7. Методология и технология профессионального образования, 5.9.2. Литературы народов мира, 5.9.5. Русский язык. Языки народов России, 5.9.6. Языки народов зарубежных стран (с указанием конкретного языка или группы языков), 5.9.9. Медиакоммуникации и журналистика

Нижний Новгород

2023 год

### 1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Конструктивная роль шума в нелинейных неравновесных системах» относится к числу *факультативных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 3-ем году обучения в 6 семестре.

**Цель дисциплины** – получение научно-обоснованных представлений о неожиданном проявлении шума в целом ряде нелинейных флуктуационных явлений, встречающихся в физике, химии, биологии. Основной задачей лекционного курса является изучение современных методов описания и статистического анализа нелинейных динамических систем на базе стохастических уравнений Ланжевена.

### 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

**Знать:**

- Основные эффекты, наблюдаемые в нелинейных динамических системах, где шум играет позитивную роль;
- Междисциплинарные приложения явлений стохастического резонанса, резонансной активации, задержки шумом распада неустойчивых состояний, рэтчет-эффекта;

**Уметь:**

- Применять к реальным задачам флуктуационно-диссипационные соотношения и теоремы, отражающие неразрывную связь флуктуаций и диссипации в физических системах;
- Использовать приближенные методы решения уравнений Фоккера-Планка;

**Владеть:**

- Методами описания явлений статистической физики на языке уравнений Ланжевена;
- Математическим аппаратом марковской теории случайных процессов.

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего – 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 1**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1 Современное состояние исследований нелинейных динамических систем	3	1				1	2
2. История открытия эффекта стохастического резонанса (СР), его приложения	7	4				4	3
3. Методы анализа СР:	8	4				4	4

двухуровневое приближение, теория линейного отклика							
4. Нелинейный режим СР: теория, численные результаты	4	2				2	2
5. Явление резонансной активации	8	4				4	4
6. Проявление стохастического резонанса и резонансной активации в мемристивных системах	8	4				4	4
7. Задержка шумом распада метастабильных и нестабильных состояний	3	2				2	1
8. Рэтчет-эффект, связь со вторым законом термодинамики	8	4				4	4
9. Броуновские моторы, их биологические приложения	7	3				3	4
10. Аномальная диффузия и методы ее математического описания	9	4				4	5
11. Полеты Леви как одна из форм супердиффузии	7	4				4	3
<b>Промежуточная аттестация:</b> - зачет							

<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>36</b>
--------------	-----------	-----------	--	--	--	-----------	-----------

**Таблица 2**

**Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Современное состояние исследований нелинейных динамических систем	Краткий обзор основных результатов по анализу индуцированных шумами различной природы явлений в поведении нелинейных динамических систем.	Лекции	-
2.	История открытия эффекта стохастического резонанса (СР), его приложения	2.1. Странная периодичность в изменении толщины арктических льдов и попытки ее объяснения. 2.2. Построение модели движения броуновской частицы в бистабильном потенциале. 2.3. Экспериментальные наблюдения эффекта в физических и нейронных системах. Конец “эксцентриситетного мифа” в геофизике.	Лекции	-
3.	Методы анализа СР: двухуровневое приближение, теория линейного отклика	3.1. Теория стохастического резонанса: а) адиабатическое и двухуровневое приближения, б) теория линейного отклика и флуктуационно-диссипационная теорема (режим слабого сигнала). 3.2. Простое объяснение эффекта и некоторые противоречия.	Лекции	-

4.	Нелинейный режим СР: теория, численные результаты	4.1. Методы анализа нелинейного режима стохастического резонанса (случай средних сигналов): а) методы обрывания по кумулянтам, б) модифицированное двухуровневое приближение. 4.2. Результаты прямого численного моделирования уравнения Ланжевена.	Лекции	-
5	Явление резонансной активации	5.1. Модель Доринга и Гадуа движения броуновской частицы в бистабильном потенциале со случайно переключающимся барьером и неожиданный результат для среднего времени его преодоления. 5.2. Объяснение обнаруженного резонансного эффекта, его модификации. 5.3. Наблюдение явления в различных системах (обзор экспериментальных данных).	Лекции	-
6.	Проявление стохастического резонанса и резонансной активации в мемристивных системах	6.1. Мемристор как элемент электрической цепи с памятью (концепция Чуа). Его возможные применения в компьютерах и нейроморфных системах. 6.2. Динамические макромоделли идеального мемристора. 6.3. Построение стохастической модели мемристора с учетом внутренних шумов. Особенности наблюдения бимодальности, явлений стохастического резонанса и резонансной активации.	Лекции	-
7.	Задержка шумом распада метастабильных и нестабильных состояний	7.1. Явление повышения шумом устойчивости метастабильного состояния системы, его объяснение через наличие обратного потока вероятности. 7.2. Аналитические результаты для фиксированного и флуктуирующего потенциальных барьеров. 7.3. Особенности проявления эффекта в различных системах.	Лекции	-
8.	Рэтчет-эффект, связь со вторым законом термодинамики	8.1. Движение броуновской частицы в периодических потенциалах. Эффективный коэффициент диффузии. 8.2. Условия появления одностороннего потока частиц (рэтчет-эффекта), не противоречащих второму закону термодинамики. 8.3. Аналитические и численные результаты для флуктуирующих и мигающих потенциалов. 8.4. Суперсимметричные потенциалы, возможность сортировки частиц.	Лекции	-

9.	Броуновские моторы, их биологические приложения	9.1. Приложения эффекта к биологическим системам: перенос кинезинов и миозинов вдоль микротрубочек цитоскелета. 9.2. Обзор основных экспериментальных результатов.	Лекции	-
10.	Аномальная диффузия и методы ее математического описания	10.1. Экспериментальные наблюдения аномальной диффузии. 10.2. Модель случайных блужданий в непрерывном времени. 10.3. Методы описания медленной диффузии (субдиффузии). Модель случайного времени (субординации).	Лекции	-
11.	Полеты Леви как одна из форм супердиффузии	11.1. Сверхбыстрая диффузия и полеты Леви. 11.2. Описание полетов Леви в рамках марковской теории. Дробное уравнение Фоккера-Планка и методы его решения. 11.3. Обзор точных аналитических результатов для статистических характеристик полетов Леви.	Лекции	-

#### **4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

1. Регулярный контроль посещаемости аудиторных занятий.
2. Собеседование с обучающимися во время аудиторных занятий.
3. Проверка освоения программы курса в форме исследовательских контрольных заданий, которые обучающиеся получают до окончания чтения лекций и должны выполнить самостоятельно, проявив навыки работы с литературными источниками, получения аналитического (или численного) и графического представления результатов расчетов.

#### **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

##### ***5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине***

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

**Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризующий оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

**5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

1. Происхождение и простая двухъямная модель для описания эффекта стохастического резонанса. Его объяснение и условия наблюдения.
2. Основные результаты теории линейного отклика в рамках флуктуационно-диссипационной теоремы.
3. Методы анализа нелинейного режима стохастического резонанса.
4. Особенности проявления эффекта в нейродинамике и нейрофизиологии.
5. Явление резонансной активации, его объяснение.
6. Свидетельства наличия стохастического резонанса и резонансной активации в мемристивных системах.
7. Эффект задержки шумом распада неустойчивой нелинейной динамической системы, его смысл.
8. Среднее время достижения барьера и нелинейное время релаксации. Их зависимость от интенсивности шума в системах с фиксированным и флуктуирующим барьером.
9. Движение броуновской частицы при фиксированном периодическом потенциале. Методы расчета эффективного коэффициента диффузии.
10. Возможность ускорения частиц в системе с быстро флуктуирующим периодическим потенциалом.
11. Случай суперсимметричного потенциала, различное поведение эффективного коэффициента диффузии.
12. Рэтчет-эффект, условия его наблюдения, связь со вторым законом термодинамики.
13. Молекулярные моторы - приложения рэтчет-эффекта к биологическим системам.
14. Явление аномальной диффузии, суб- и супердиффузия, экспериментальные наблюдения. Модель случайных блужданий в непрерывном времени.
15. Математический аппарат описания субдиффузии. Модель субординации.
16. Марковский подход к анализу супердиффузии в форме полетов Леви. Основные результаты для установившихся временных и вероятностных характеристик, понятие конфайнмента.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) Основная литература**

1. Gammaitoni L., Hänggi P., Jung P., Marchesoni F. Stochastic resonance: A remarkable idea that changed our perception of noise. Eur. Phys. J. B V.69. P.1 (2009).
2. McDonnell M.D., Abbott D. What is stochastic resonance? Definitions, misconceptions, debates, and its relevance to biology. PLOS Computational Biology. V.5. P.1000348 (2009).
3. Schmitt C., Dybiec B., Hänggi P., Bechinger C. Stochastic resonance vs. resonant activation. Europhys. Lett. V.74. P.937 (2006).

### **б) Дополнительная литература**

1. Дубков А.А. Конструктивная роль шума в нелинейных неравновесных системах: Учебно-методические материалы для магистрантов и аспирантов. Нижний Новгород: ННГУ, 2014. 37 с.
2. Cherepov S.S., Koop B.C., Dzhazherya Yu.I., Worledge D.C., Korenivski V. Resonant activation of a synthetic antiferromagnet. Phys. Rev. Lett. V.107. P.077202 (2011).
3. Jia Z.L., Mei D.C. Controlling the noise enhanced stability effect via noise recycling in a metastable system. Eur. Phys. J. B V.85. P.139 (2012).
4. Mikhailov A.N., Guseinov D.V., Belov A.I., Korolev D.S., Shishmakova V.A., Koriazhkina M.N., Filatov D.O., Gorshkov O.N., Maldonado D., Alonso F.J., Roldan J.B., Krichigin A.V., Agudov N.V., Dubkov A.A., Carollo A. and Spagnolo B. Stochastic resonance in a metal-oxide memristive device. Chaos, Solitons & Fractals. V.144, P.110723 (2021).

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):

<http://e.lanbook.com/>;

<http://www.biblioclub.ru>.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
- лицензионное программное обеспечение: *Windows, MicrosoftOffice*;
- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122),

Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор\_\_\_\_\_А.А. Дубков

Рецензент \_\_\_\_\_ Н.В. Агудов

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ А.А. Дубков

**Программа одобрена** на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «20» января 2022 года, протокол № 01/22.