



АВТОВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Программа специального курса для биофизиков и радиофизиков (32 часа)

Ю.М. Романовский

1. Определение автоволнового процесса (АВП) [1, 3, 4, 17, 18]. Под автоволновым процессом принято понимать самоподдерживающийся в активной нелинейной среде волновой процесс (включая стационарные пространственные структуры), сохраняющий свои характеристики постоянными за счет распределенного в среде источника энергии. Эти характеристики – период, длина волны или импульса, скорость распространения, амплитуда и форма в установившемся режиме зависят лишь от локальных свойств среды и в определенных пределах не зависят от краевых и начальных условий. При этом в пространстве предполагается связь посредством переноса диффузионного типа.

АВП являются распространяющиеся фронты горения, фронты переброса фазы, разнообразные распределенные химические реакции (например, образование спиральных волн в плоских химических реакторах), большое число процессов в живых организмах (распространение нервных импульсов и механохимические процессы подвижности живых клеток). Страты в газовом разряде и образование структур в расплавах под действием лазера также являются АВП. Автоволны являются одним из важнейших факторов самоорганизации в термодинамических открытых неравновесных системах (в биосфере, космосе, в экологических сообществах, в оптических активных средах, в любом живом организме).

2. Математическая модель автоволновой системы [1, 3, 12]. Многокомпонентная система уравнений нелинейной диффузии взаимодействующих между собой переменных x_i , зависящих как от времени, так и от пространственных координат, представляет собой базовую модель АВП.

Физический смысл переменных x_i в физике, химии и биологии. Диффузионная матрица, описывающая процессы переноса. Коэффициенты диффузии и взаимной диффузии. Типы краевых условий. Случай нелокальных взаимодействий. Нелинейность коэффициентов диффузии. Переход к точечным моделям в случае полного перемешивания среды.

3. Классификация АВП [1, 3, 4, 6, 11]. Бегущий фронт (БФ), бегущий импульс (БИ), резерватор, синхронные в пространстве автоколебания и стоячие волны, диссипативные структуры (ДС) – стационарные пространственные распределения переменных, локальные источники автоволн – ведущие центры и метастабильные ДС. Примеры различных типов АВП и методы их наблюдения в средах различной природы.

4. Исследование устойчивости однородных решений [1, 2, 3, 11, 15]. Получение стационарных однородных в пространстве решений базовой модели. Линеаризация модели. Вывод дисперсионного или характеристического уравнения, связывающего волновые числа и комплексные частоты отдельных малых гармонических возмущений. Общий анализ решения дисперсионного уравнения. Основные типы неустойчивостей в системах первого, второго и третьего порядков. Примеры: брюсселятор, распределенное уравнение Ван-дер-Поля. Роль краевых условий в отборе физически реализуемых возмущений.

5. Автомодельные решения для АВП [1, 2, 6, 15, 16]. Метод введения автомодельной переменной на примере задачи о нелинейном активном кабеле. Уравнения нервной проводимости. Ионные токи через мембрану нервного волокна. Уравнения Ходжкина – Хаксли для аксона кальмара. Автомодельные решения для упрощенной системы нервной проводимости Фитц – Хью – Нагумо.

6. Бегущие фронты [1, 2, 15]. Задача Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова для распространения гена. Стационарные БФ и процессы установления. Пульсации скорости фронта. Проблема устойчивости формы фронта.

7. Бегущие импульсы [1, 2, 4, 16, 18]. Стационарный БИ и его отличие от солитона. Формирование БИ. Метод рассмотрения БИ по Кернеру и Осипову. Аксиоматическая модель возбудимой среды. Порог возбуждения, рефрактерное время.

8. Автономные источники волн [1, 11, 12, 13, 18]. Неустойчивые источники типа «эхо». Стабильные ведущие центры. Модель «орегонатор» для автоколебательной окислительно-восстановительной реакции Белоусова – Жаботинского. Ревербераторы, или спиральные волны в двухмерных химических реакторах и возбудимой системе сердца. Модели патологии сердечной деятельности. Ядро ревербератора и зависимость скорости от кривизны фронта.

9. Синхронизация автоколебаний в пространстве как фактор самоорганизации [1, 2, 3]. Фазировка автоколебаний в однородных системах. Пример распределенной системы Ван-дер-Поля. Синхронизация в неоднородных системах. Полоса синхронизации и распределения фаз в случае эквидистантных расстроек. Сложные квазистохастические режимы, возникающие при нарушении синхронизации. Синхронные сети автогенераторов в современной радиоэлектронике. Вычислительные проблемы при представлении автоволновой системы в виде дискретной модели с конечным числом степеней свободы.

10. Диссипативные структуры [1, 2, 3, 4, 6, 12, 15, 18]. Условия существования стационарных неоднородных решений. Ветвления решений и квазигармонические распределения. Контрастные и распределенные ДС. Методы расчета ДС по Кернеру и Осипову. Метастабильные ДС в однокомпонентных системах с нелинейными источниками и нелинейными коэффициентами диффузии. Режимы с обострением по Курдюмову – Самарскому. ДС в теории биологического морфогенеза. Модели Гирера и Майнхарта и модель распределенного генетического триггера Чернавского.

11. Шумы и АВП [1, 3, 9, 11]. Источники шумов в активных кинетических системах. Основные стохастические задачи. Среднее время существования простейшей экологической системы Вольтерра. Естественные шумы и пространственная самоорганизация. Уравнения «мастер-экуэйшен» для модели «брюсселятор». Мультипликативные шумы или флуктуация параметров. Пример уравнения Ландау – Гинзбурга.

12. Автоволновые механизмы подвижности живых клеток [1, 7, 8]. Различные типы подвижности. Амебоидная подвижность. Акттомиозиновые взаимодействия. Устройство саркомера – элемента мышечного волокна. Модель автоволновых течений в многоядерной амебе – плазмодии миксомицета.

Фонтанирующие потоки в амебoidных клетках и механизмы миграции. Автоволны в кровеносных сосудах и кишечнике.

13. Автоволновые явления в оптичеcки-активных средах [5]. Лазер как самоорганизующаяся система. Пространственные эффекты в бистабильных оптических системах. Генерация структур в оптических системах с двумерной обратной связью. Понятие о биокомпьютерах и клеточных автоматах.

14. Сводка достаточных условий существования различных типов АВП [1, 2, 3, 4].

Спецкурс «Автоволновые процессы в физике, химии и биологии» (АВП) входит в систему лекций, читаемых на кафедре общей физики и волновых процессов (ОФ и ВП, заведующий кафедрой проф. Н.И. Коротеев) радиофизического отделения (всего эта кафедра выпускает 30–35 дипломников в год). С одной стороны, курс АВП входит в тройку спецкурсов кафедры, касающихся физики и лазерной физики живой материи. На четвертом курсе доц. А.П. Приезжев много лет читает курс «Введение в лазерную биофизику». На пятом курсе после АВП с.н.с. А.Ю. Чикишевым и проф. Ю.М. Романовским читается курс «Математические модели и лазерная спектроскопия макромолекул». С другой стороны, АВП является дополнением к общеотделенческому курсу проф. В.В. Мигулина и проф. В.Н. Парыгина «Теория колебаний», читаемых в шестом семестре и нового курса доц. П.В. Елютина «Нелинейная динамика», который посещает около половины студентов-радиофизиков на четвертом курсе. Следует сказать, что постоянно действующий на физическом факультете семинар «Синергетика», возглавляемый проф. Ю.Л. Климонтовичем, привлекает молодежь, связывающую свои интересы с различными проблемами нелинейной динамики. Эти системы курсов существуют и развиваются в тесной связи с целой сетью курсов по лазерной физике, нелинейной оптике, численным методам в физике, читаемых на кафедре ОФ и ВП, кафедре квантовой радиофизики (заведующий кафедрой академик Л.В. Келдыш) и в Международном лазерном учебно-научном центре МГУ.

Литература

1. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.
2. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984.
3. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическое моделирование в биофизике. М.: Наука, 1975.
4. Кернер Б.С., Осипов В.В. Автосолитоны. М.: Наука, 1991.
5. Новые физические принципы оптической обработки информации / Под ред. С.А. Ахманова и М.А. Воронцова. М.: Наука, 1990.
6. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.
7. Рубин А.Б. Биофизика. М.: Высшая школа, 1987. Т. I, II.
8. Романовский Ю.М. Математические модели внутриклеточной подвижности // Математическое моделирование. М., 1992.
9. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М.: Наука, 1992.
10. Полак Л.С., Михайлов А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983.
11. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990.
12. Автоволновые процессы в системах с диффузией / Под ред. М.Т. Греховой. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.

13. Коллективная динамика возбуждения и структурообразования в биологических тканях / Под ред. В.Г. Яхно. Горький: ИПФ АН СССР, 1987.
14. *Белинцев Б.Н.* Физические основы биологического формообразования. М.: Наука, 1991.
15. *Марри Д.Ж.* Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях. М.: Мир, 1982.
16. *Скотт А.* Волны в активных средах в приложении к электронике. М.: Мир, 1979.
18. *Иваницкий Г.Р., Кринский В.И., Сельков Е.Е.* Математическая биофизика клетки. М.: Наука, 1978.
19. *Романовский Ю.М., Теплов В.А.* Физические основы клеточного движения. Механизмы самоорганизации амебодной подвижности // УФН. 1995. Т. 165, № 5. С. 555.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию 5.12.96



Романовский Юрий Михайлович, 1929 года рождения, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1952 году, доктор физико-математических наук. В настоящее время профессор физического факультета Московского университета, руководитель лаборатории лазерной и математической биофизики. Автор 6 монографий, посвященных проблемам динамики нелинейных систем и математической биофизике.