

УДК 167.7

DOI: 10.15372/PS20240205

EDN XJOLEF

А.Ю. Гордеев, В.А. Мукин**ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О САМООРГАНИЗАЦИИ
В ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: ОТ КИНЕТИЧЕСКИХ
ТЕОРИЙ К СИНЕРГЕТИКЕ**

Статья посвящена истории зарождения, роста и трансляции научного знания, связанного с фундаментальными аспектами самоорганизации в химических системах, начиная от роли кинетических теорий и заканчивая применением современных технологий и методов исследования. Цель работы заключается в системном обосновании закономерности самоорганизации в химии. Кроме того, выявлены и обоснованы основные принципы и механизмы синергетического подхода к химическому исследованию. Предложен комплекс логически структурированных операций, направленных на генерирование новых научных знаний в области химии. Показано, что синергетический подход открывает возможность получения знаний, выходящих за пределы ожидаемого научного результата.

Ключевые слова: философия науки; самоорганизация в химических системах; эмерджентность; бифуркация в химии; химическая турбулентность; современные технологии

A. Yu. Gordeev, V. A. Mukin**EVOLUTION OF IDEAS ABOUT SELF-ORGANIZATION
IN CHEMICAL SYSTEMS: FROM KINETIC THEORIES
TO SYNERGETICS**

The article deals with the history of the origin, growth and translation of scientific knowledge related to the fundamental aspects of self-organization in chemical systems, starting from the role of kinetic theories and ending with the use of modern technologies and research methods. The purpose of the work is to systematically substantiate the patterns of self-organization in chemistry. In addition, the basic principles and mechanisms of the synergetic approach to chemical research are identified and substantiated. A set of logically structured operations aimed at generating new scientific knowledge in the field of chemistry is proposed. It is shown that the synergetic approach opens up the possibility of obtaining knowledge that goes beyond the expected scientific result.

© Гордеев А.Ю., Мукин В.А., 2024

Keywords: philosophy of science; self-organization in chemical systems; emergence; bifurcation in chemistry; chemical turbulence; modern technologies

Самоорганизация – это процесс, в ходе которого система демонстрирует способность организовывать свою структуру и поддерживать порядок даже без воздействия внешних факторов. Сказанное относится и к самоорганизации в химических системах. Это фундаментальное явление, которое подчеркивает внутреннюю динамику системы и ее способность к автономному изменению состояния [4].

Основные принципы самоорганизации включают положительную обратную связь, нелинейность и возможность перехода в устойчивые состояния. Эти принципы служат основой для понимания того, как химические системы могут организовывать свою структуру, даже находясь в открытых условиях.

В результате самоорганизации в химических системах возникают эмерджентные свойства в химических системах возникают выходящие за пределы простого суммирования характеристик отдельных элементов системы – молекул и реакций. В контексте химии эмерджентность представляет собой явление, при котором система обретает свойства, непредсказуемые из изучения ее отдельных компонентов. Рассмотрим, как самоорганизация воздействует на структуру и поведение химических систем, порождая феномены, которые невозможно предсказать только на основе свойств отдельных элементов [7].

Внимательное исследование воздействия самоорганизации на структуру химических систем раскрывает спектр сложных и красочных проявлений. Эти эмерджентные свойства включают формирование интригующих узоров, образование волновых явлений и проявление колебательных реакций, которые становятся непосредственно видимыми в химических системах. Одним из замечательных примеров самоорганизации является реакция Белоусова – Жаботинского (ее мы будем упоминать и далее). В этой системе колебательных реакций наблюдаются периодические изменения в концентрации реагентов, порождающие уникальные и устойчивые паттерны. Красочные колебания цвета и формы дают визуальное подтверждение эмерджентности, когда сложные структуры возникают из неожиданных взаимодействий молекул, не поддающихся полному предсказанию. Такие примеры ярко демонстриру-

ют воздействие самоорганизации на структурное разнообразие химических систем, подчеркивая их удивительные нелинейные свойства.

Под воздействием самоорганизации химические системы проявляют динамические изменения в своем поведении: периодические колебания концентрации реагентов, переходы между различными состояниями и образование химических градиентов. Эти явления не только демонстрируют сложность системы, но и подчеркивают ее способность к адаптации под воздействием самоорганизации.

Эмерджентные свойства, такие как образование сложных структур и динамические изменения, являются результатом самоорганизации в химических системах. Это важное понимание, оно послужит ключом при изучении конкретных механизмов и проявлений самоорганизации.

Значительную роль в исследовании самоорганизации химических систем играют кинетические теории. В рамках этих теорий рассматривается, как скорость химических реакций и их механизмы формируют самоорганизованные структуры. Взаимосвязь между кинетикой реакций и эмерджентными явлениями – важный аспект для понимания того, как системы организуют свою структуру [3].

Роль кинетических теорий в химии состоит в том, что они предоставляют фундаментальный обзор механизмов, определяющих скорость химических реакций и их влияние на формирование самоорганизованных структур. Рассмотрим, как кинетика химических процессов может стать катализатором для образования в химических системах сложных и порой удивительных структур.

Динамический и периодический характер некоторых химических систем может быть прямым следствием скорости реакций, оказывающей влияние на самоорганизацию. Посмотрим, например, на реакцию Белоусова – Жаботинского: высокая скорость реакций в этой системе способствует образованию колебательных структур, создавая поразительные визуальные эффекты, которые впечатляют своими устойчивыми паттернами и формами.

Представление о взаимосвязи между кинетикой и эмерджентностью в химических системах поднимает важные вопросы о том, как скорость реакций и механизмы взаимодействия молекул на микроуровне определяют уникальные свойства систем на уровне эмерджентности. И позволяет глубже понять, как процессы самоор-

ганизации вытекают из кинетических законов, становясь неотъемлемой частью поведения химических систем.

Рассмотрим как пример кинетику и эмерджентные свойства в химической турбулентности. Исследование химической турбулентности подчеркивает тесную связь между кинетикой и эмерджентностью. Нелинейные взаимодействия молекул и конкуренция между различными реакциями приводят к неожиданным и сложным формам организации, создавая уникальные эмерджентные явления, которые можно объяснить только при учете кинетических аспектов [9].

Химическая турбулентность: – это один из примеров влияния кинетики на самоорганизацию. Кинетика химических реакций может вызывать турбулентные потоки в реакционных средах, приводя к формированию сложных структур [12]. Другой пример – осцилляторные реакции: Химические системы с осцилляторными реакциями могут продемонстрировать самоорганизацию в виде колебательных паттернов и динамических изменений.

Исследование взаимосвязи кинетики химических реакций и процессов самоорганизации показало значимость реакционных механизмов и энергии активации в формировании самоорганизованных структур. Энергия активации выступает как ключевой фактор, определяющий возможность образования сложных систем без внешних воздействий. Конкуренция реакций в системах с несколькими путями обуславливает динамику образования различных структур, зависящую от их относительных скоростей.

Кинетические теории не только объясняют химические реакции, но и оказывают существенное влияние на формирование представлений о самоорганизации химических систем. Эта взаимосвязь имеет ключевое значение при анализе эмерджентных свойств в контексте кинетики.

Реакция Белоусова – Жаботинского представляет собой уникальный пример химической системы, в которой феномен самоорганизации проявляется через колебательные реакции. Рассмотрим этот механизм как иллюстрацию механизмов самоорганизации в химических системах. Реакция Белоусова – Жаботинского – это колебательная химическая реакция, в которой периодически меняются концентрации различных компонентов [1]. В результате реакции формируются порядочные структуры в виде колебательных волн, которые чередуются с хаотическими изменениями в системе.

Самоорганизация в этой системе обусловлена положительной обратной связью между концентрациями различных компонентов, что приводит к возникновению периодических колебаний. Образование осцилляторных структур в реакции связано с нелинейными зависимостями между скоростями различных реакций.

На самоорганизацию в реакции Белоусова – Жаботинского влияют определенные параметры, например изменение температуры влияет на скорость реакций и, следовательно, на характер самоорганизованных колебаний. Также добавление катализаторов может изменять условия реакции, воздействуя на формирование определенных структур в системе.

Образование колебательных волн и переход между хаотическим и упорядоченным состояниями в реакции Белоусова – Жаботинского являются примером эмерджентного поведения в системе. Видение реакции как самоорганизующейся системы обеспечивает более глубокое понимание взаимодействия компонентов и их влияния на динамику системы.

Реакция Белоусова – Жаботинского служит примером того, как самоорганизация может проявляться в колебательных реакциях. Ее анализ предоставляет ценные инсайты относительно механизмов самоорганизации и эмерджентного поведения в химических системах, что является ключевым моментом для понимания сложных явлений в химии.

Бифуркации представляют собой особый класс явлений в химических системах, при которых изменение параметров может привести к кардинальным изменениям в структуре и свойствах системы. Рассмотрим их как механизм самоорганизации в химии. Бифуркации – это точки в параметрическом пространстве, где изменение параметров приводит к качественным изменениям в динамике системы [11]. Они могут вызывать изменение структуры системы, включая образование новых устойчивых состояний или изменение стабильности существующих.

В химии выделяют следующие виды бифуркаций: суперкритическая бифуркация происходит при изменении параметров, приводящих к возникновению новых устойчивых состояний системы; подкритическая бифуркация ведет к потере стабильности существующих состояний, что может вызвать переход к хаотическому или неустойчивому поведению.

Рассмотрим влияние бифуркаций на химические системы. Бифуркации чувствительны к изменениям параметров системы, таких

как температура, концентрация реагентов и давление. Под воздействием этих изменений бифуркации могут приводить к неожиданным переходам между различными состояниями системы, включая периодические и хаотические режимы. Бифуркации могут вызывать появление химических осцилляций, когда система переходит между различными стабильными состояниями. В системах с неоднородной структурой бифуркации могут приводить к формированию фронтных волн и других сложных структур.

Представление о бифуркациях служит инструментом для анализа и понимания самоорганизации в химических системах. Их изучение не только раскрывает особенности динамики системы, но также предоставляет возможности для контроля химических процессов и манипуляции ими.

Химическая турбулентность представляет собой удивительный феномен самоорганизации в химических системах, проявляющийся в нелинейных и хаотических процессах. Рассмотрим, как этот механизм возникает в результате сложных взаимодействий в реакционных средах.

Турбулентность в химии аналогична турбулентности в физике и характеризуется хаотическими и неупорядоченными движениями в реакционной среде [6]. Химическая турбулентность часто связана с неустойчивостью потоков реагентов и продуктов в пространстве.

Существуют различные механизмы химической турбулентности. Например, она может быть результатом сложных и нелинейных взаимодействий между компонентами реакционной среды. Еще один механизм – фронтные волны. Образование фронтных волн, где соседние области реакционной среды могут находиться в различных фазах реакции, способствует хаотическим движениям.

На интенсивность и характер химической турбулентности изменение концентрации реагентов. Возможны турбулентные режимы при различных температурах, что вносит вариабельность в характер реакции.

Примером химической турбулентности является реакция Белоусова – Жаботинского – Спенс: в ней проявляются яркие турбулентные режимы, сопровождающиеся сложными колебательными паттернами. Химическая турбулентность обнаружена также в реакции Белоусова – Жаботинского, где возможны сложные структуры в виде вихрей и периодических волн.

Химическая турбулентность представляет собой уникальное проявление самоорганизации в химических системах, при котором нелинейные взаимодействия приводят к хаотическим и сложным колебаниям в реакционных средах. Изучение этого феномена не только обогащает наше понимание фундаментальных химических процессов, но также имеет практическое значение в контексте управления реакциями и оптимизации химических производств.

Для исследований в области химии плодотворен синергетический подход. Под синергетическим подходом к химическому исследованию мы понимаем его рассмотрение как комплекса логически структурированных операций, направленных на генерирование новых научных знаний в области химии. Этот подход позволяет исследовать системы, проявляющие самоорганизацию, что приводит их к определенному аттрактору в процессе развития.

Синергетический подход учитывает, что в определенные моменты своего существования система находится в точках бифуркации, что влечет за собой ее нелинейное развитие. Этот подход открывает возможность для генерации научных знаний, выходящих за пределы ожидаемого научного результата. Несмотря на то что процесс научного исследования состоит из определенных этапов, в рамках синергетического подхода эти этапы рассматриваются как сложные открытые саморазвивающиеся объекты [8].

Современные достижения в области научных методов и технологий играют решающую роль в понимании и исследовании явлений самоорганизации в химических системах. Рассмотрим три ключевых метода, широко применяемых для детального анализа самоорганизованных структур и процессов.

Высокоразрешающая микроскопия предоставляет уникальные возможности для визуализации и анализа структур на наномасштабах в химических системах. Современные методы, такие как сканирующая зондовая микроскопия, позволяют регистрировать даже мельчайшие детали, что открывает новые горизонты в изучении самоорганизации. Результаты микроскопических исследований предоставляют ценные данные о формировании узоров, структурных особенностях и динамике взаимодействия компонентов в химических системах [5].

Фемтосекундная спектроскопия является мощным инструментом для изучения высокоскоростных химических процессов и моле-

кулярных изменений в реальном времени. Этот метод позволяет регистрировать молекулярные переходы и колебания с невиданным разрешением. Применение фемтосекундной спектроскопии в исследованиях самоорганизации помогает раскрыть механизмы быстрых реакций, определить переходные состояния и выявить ключевые этапы формирования сложных структур [2].

Компьютерное моделирование все более становится неотъемлемой частью исследований в области самоорганизации химических систем. Системы могут быть представлены математическими моделями, которые учитывают кинетические и термодинамические параметры. Моделирование позволяет не только анализировать прошлые эксперименты, но и предсказывать возможные сценарии самоорганизации в новых условиях. Это ключевой инструмент для понимания процессов самоорганизации в различных химических системах и управления ими [10].

Итак, современные технологии визуализации, высокоскоростного анализа и компьютерного моделирования предоставляют уникальные возможности для глубокого изучения явлений самоорганизации в химических системах. Их совместное применение позволяет не только наблюдать, но и понимать молекулярные процессы, лежащие в основе формирования сложных структур и эмерджентных явлений.

Рассмотрим перспективы и направления, которые могут стать ключевыми для будущих исследований в области самоорганизации в химии. С учетом текущих тенденций и проблем, они покажут возможные пути развития этой захватывающей области химической науки.

Исследования в области новых материалов. Исследования, направленные на создание новых самоорганизующихся наноструктур, могут привести к разработке материалов с уникальными свойствами, применимых в электронике, фотонике и других сферах. Изучение принципов самоорганизации в биологических системах может вдохновить на создание новых биоинспирированных материалов с улучшенными функциональными характеристиками.

Развитие методов моделирования и анализа. Совершенствование методов молекулярного моделирования и машинного обучения позволит более точно предсказывать и анализировать процессы самоорганизации на молекулярном уровне. Исследования в области системной биологии могут помочь объяснить взаимодействия и ди-

намику в сложных химических системах, что важно для понимания самоорганизации.

Исследования в области квантовой химии и нанотехнологий. Глубокие исследования квантово-химических аспектов самоорганизации могут расширить понимание квантовых эффектов в химических системах. Развитие нанотехнологий, основанных на принципах самоорганизации, может привести к созданию новых методов синтеза наноматериалов с уникальными свойствами.

Исследования в области химической биологии и медицины. Изучение самоорганизации в клетках может способствовать созданию новых методов лечения заболеваний и разработке инновационных подходов в медицине. Применение принципов самоорганизации в создании носителей для таргетированной доставки лекарств может улучшить эффективность терапии и снизить побочные эффекты.

Междисциплинарные исследования и обмен знаниями. Интеграция принципов физики и химии в исследованиях по самоорганизации может привести к формированию новых представлений о сложных химических системах. Реализация междисциплинарных проектов, объединяющих химиков, физиков, биологов и инженеров, позволит решать сложные проблемы исследования самоорганизации. Перспективы будущих исследований в области самоорганизации в химии лежат в развитии новых материалов, методов моделирования и анализа, а также в совмещении знаний из различных дисциплин. Междисциплинарный подход, новые технологии и фундаментальные исследования могут значительно влиять на будущее этой захватывающей области науки.

В ходе настоящего исследования были проведены обширная аналитическая ревизия и анализ современных тенденций в области изучения самоорганизации в химии. Анализируя кинетические теории, концепцию самоорганизации и применение синергетики, мы сфокусировались на их влиянии на формирование представлений о химических процессах и поведении химических систем.

Мы рассмотрели развитие кинетических теорий в химии, выявив их существенное влияние на понимание химических процессов. Подчеркнули роль кинетических факторов и механизмов в химической кинетике, а также их влияние на поведение химических систем. Обсудив концепцию самоорганизации и ее связь с кинети-

ческими теориями, мы показали, что самоорганизация может быть ключевым фактором в объяснении поведения химических систем. Выявили важность взаимодействий и эмерджентных свойств в химической самоорганизации, а также рассмотрели перспективы будущих исследований в данной области.

В заключение можно отметить, что исследования в области самоорганизации в химии имеют значительный потенциал для разработки новых материалов, для совершенствования технологических процессов и для расширения фундаментальных знаний. Междисциплинарный характер подхода, включающего кинетические, синергетические концепции и концепцию самоорганизации, является ключом к пониманию сложных химических систем и открывает путь для инноваций в различных областях науки и промышленности.

Литература

1. *Аронов М.А., Анисенко А.Н.* Экспериментальные исследования колебательной реакции Белоусова – Жаботинского с использованием ферроина // Юный ученый. 2018. № 1 (15). С. 60–62.
2. *Афанасьев А.Е., Машко А.М., Мейстерсон А.А., Балыкин В.И.* Спектроскопия атомов рубидия в импульсной оптической дипольной ловушке фемтосекундной длительности // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 111, № 11–12 (6). С. 757–762.
3. *Ахметшин Э.А., Шагалова Ю.С.* Кинетика химических реакций и выбор реагентов для обогащения кристаллосырья берилла Малышевского месторождения методом избирательного химического травления // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. XXXV, № 6. С. 15–18.
4. *Баранова О.А.* Физико-химические аспекты самоорганизации супрамолекулярной системы на основе водного раствора L-цистеина и нитрата серебра: Автореф. дисс. ... канд. хим. наук: 02.00.04. Тверь, 2013. 22 с.
5. *Гутаковский А.К., Латышев А.В.* Применение аналитической высокоразрешающей электронной микроскопии для анализа атомного строения и механизмов формирования нанокристаллов в полупроводниковых гетеросистемах // Современные методы электронной, зондовой микроскопии и комплементарных методов в исследованиях наноструктур и наноматериалов: Сб. тез. XXVIII Рос. конф. по электронной микроскопии. М.: ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 2020. Т. 2. С. 22–29.
6. *Лебедь И.В.* Влияние спонтанных флуктуаций на возникновение и развитие турбулентности. 1. Расчет вклада спонтанных флуктуаций // Химическая физика. 2022. Т. 41, № 1. С. 77–87.
7. *Мальфанов И.Л., Ванга В.К.* Химические микроосцилляторы на основе реакции Белоусова – Жаботинского // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 10. С. 1263–1268.
8. *Чунихин С.С., Мукин В.А.* Эффективность синергетического подхода в химическом исследовании // Философия науки. 2019. № 1 (80). С. 96–105.

9. Шека Е.Ф., Попова Н.А., Попова В.А. Физика и химия графена. Эмерджентность, магнетизм, механофизика и механохимия // Успехи физических наук. 2020. Т. 188, № 7. С. 720–772.

10. Doroshenko E.M., Doroshenko K.V., Ostapenko A.B., Rasskazova A.V. Computer modeling of various salts interaction with arsenopyrite // Вода: химия и экология. 2023. № 5. С. 48–54.

11. Magnitsky N.A. Bifurcation Theory of Dynamical Chaos // Chaos Theory. Intech, 2020. P. 227–238.

12. Yu C., Breda P., Pfitzner M., Maas U. Coupling of mixing models with manifold based simplified chemistry in PDF modeling of turbulent reacting flows // Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Technical Thermodynamics, Engelbert-Arnold-Strasse 4, Geb.10.91. 2021. Т. 38. № 2. С. 2645–2653.

References

1. Aronov, M.A. & A.N. Anisenko. (2018). Eksperimentalnye issledovaniya kolebatelnoy reaktsii Belousova – Zhabotinskogo s ispolzovaniem ferroina [Experimental studies of the Belousov–Zhabotinsky oscillatory reaction using ferroin]. *Yunyuy uchenyy [Young Scientist]*, 1 (15), 60–62.

2. Afanasiev, A.E., A.M. Mashko, A.A. Meysterson & V.I. Balykin. (2020). Spektroskopiya atomov rubidiya v impulsnoy opticheskoy dipolnoy lovushke femtosekundnoy deyatelnosti [Spectroscopy of rubidium atoms in a femtosecond pulsed optical dipole trap]. *Pisma v Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics]*, Vol. 111, No. 11–12 (6), 757–762.

3. Akhmetshin, E.A & Y.S. Shagalova. (2021). Kinetika khimicheskikh reaktsiy i vybor reagentov dlya obogashcheniya kristallosyrya berilla Malyshevskogo mestorozhdeniya metodom izbiratel'nogo khimicheskogo travleniya [Kinetics of chemical reactions and selection of reagents for enrichment of crystal raw materials of beryll of the Malyshevsky deposit by the method of selective chemical etching]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Advances in Chemistry and Chemical Technology]*, Vol. XXXV, No. 6, 15–18.

4. Baranova, O.A. (2013). Fiziko-khimicheskie aspekty samoorganizatsii supramolekulyarnoy sistemy na osnove vodnogo rastvora L-tsisisteina i nitrata serebra [Physico-chemical aspects of self-organization of a supramolecular system based on an aqueous solution of L-cysteine and silver nitrate]. Author's abstract of the Candidate of Sciences (Chemistry) thesis. Tver, 22.

5. Gutakovsky, A.K. & A.V. Latyshev. (2020). Primenenie analiticheskoy vysokorazreshayushchey elektronnoy mikroskopii dlya analiza atomnogo stroeniya i mekhanizmov formirovaniya nanokristallov v poluprovodnikovyykh geterosistemakh [Application of analytical high-resolution electron microscopy to analyze the atomic structure and mechanisms of formation of nanocrystals in semiconductor heterosystems]. In: *Sovremennyye metody elektronnoy, zondovoy mikroskopii i komplementarnyykh metodov v issledovaniyakh nanostruktur i nanomaterialov [Modern Methods of Electron and Probe Microscopy and Complementary Methods in the Study of Nanostructures and Nanomaterials]*: Collection of abstracts of the XXVIII Russian Conference on Electron Microscopy, Vol. 2. Moscow, Federal Research Center “Crystallography and Photonics” RAS, 20–29.

6. Lebed, I.V. (2022). Vliyanie spontannykh fluktuatsiy na vozniknovenie i razvitiye turbulentsnosti. 1. Raschet vklada spontannykh fluktuatsiy [The influence of spontaneous fluctuations on the occurrence and development of turbulence. 1. Calculation of the contri-

bution of spontaneous fluctuations]. *Khimicheskaya fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics], Vol. 41, No. 1, 77–87.

7. *Mallphanov, I.L. & V.K. Vanag.* (2021). *Khimicheskie mikroostillyatory na osnove reaktsii Belousova – Zhabotinskogo* [Chemical micro-oscillators based on the Belousov–Zhabotinsky Reaction]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], Vol. 90, No. 10, 1263–1268.

8. *Chunikhin, S.S. & V.A. Mukin.* (2019). *Effektivnost sinergeticheskogo podkhoda v khimicheskoy issledovanii* [The effectiveness of the synergetic approach in a chemical research]. *Filosofiya nauki* [Philosophy of Science], 1 (80), 96–105.

9. *Sheka, E.F., N.A. Popova & V.A. Popova.* (2018). *Fizika i khimiya grafena: Emerdzhentnost, magnetizm, mekhanofizika i mekhanokhimiya* [Physics and chemistry of grapheme: Emergentness, magnetism, mechanophysics and mechanochemistry]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], Vol. 188, No. 7, 720–772.

10. *Doroshenko, E.M., K.V. Doroshenko, A.B. Ostapenko & A.V. Rasskazova.* (2023). *Computer modeling of various salts interaction with arsenopyrite. Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology], 5, 48–54.

11. *Magnitsky, N.A.* (2020). *Bifurcation theory of dynamical chaos.* In: *Chaos Theory.* Intech, 227–238.

12. *Yu C., P. Breda, M. Pfitzner & U. Maas.* (2020). *Coupling of mixing models with manifold based simplified chemistry in PDF modeling of turbulent reacting flows.* *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, No. 2, 2645–2653.

Информация об авторах

Гордеев Алексей Юрьевич. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Чебоксары, Московский просп., 15).
alekcg99@bk.ru

Мукин Владимир Антонович. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Чебоксары, Московский просп., 15).
mukin-va@yandex.ru

Information about the authors

Gordeev, Alexey Yurievich. Chuvash State University named after I.N. Ulyanov (15, Moskovsky ave., Cheboksary, 428015, Russia).

Mukin, Vladimir Antonovich. Chuvash State University named after I.N. Ulyanov (15, Moskovsky ave., Cheboksary, 428015, Russia).

Дата поступления 18.01.2024