

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Смелова Павла Сергеевича на тему  
«Изучение динамических режимов малой сети осцилляторов, связанных  
импульсной ингибирующей связью с временной задержкой» представленной на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.03 – Радиофизика

Диссертационная работа П.С. Смелова относится к современной области теории динамических систем, рассматривающей химические аналоги радио- и биофизических связанных автоколебательных и возбудимых элементов, что является классической областью специальности «Радиофизика». При этом, в то время как соответствующие аналоги индивидуальных осцилляторов достаточно хорошо изучены, их объединение в сетевые структуры с различным типом связей является существенно новой и актуальной задачей. Одним из подтверждений интереса научного сообщества к кругу задач, поставленных и решенных в рамках данного исследования, является публикация результатов, выносимых на защиту, в ведущих научных журналах по данной тематике, известных достаточно жестким отбором поступающих рукописей по критерию актуальности тематики; в частности это относится к *Physical Chemistry Chemical Physics*, в котором диссертантом опубликованы три статьи из шести.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырех глав, заключения, а также снабжена терминологическим справочным материалом и списком литературы, в достаточной степени отражающим знакомство диссертанта с основными научными публикациями по тематике его работы.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы и формулируются следующие из нее поставленные цель и задачи работы, указываются научная новизна и выносимые на защиту положения, приводятся необходимые сведения о теоретической и практической значимости работы, ее методологии, личном вкладе автора, апробации и публикации результатов, а также анонсируется краткое содержание работы в ее распределении по главам. Следующий далее краткий литературный обзор, несмотря на отдельные недочеты (см. далее) дает в целом адекватное представление об основных классических и современных подходах к задачам моделирования нейроподобных осцилляторов и их систем, а также об представляющих современный интерес вопросах химических автоколебаний и автоволн, решаемых методами и подходами, развитыми в радиофизике.

**Первая** глава посвящена задаче всестороннего исследования динамики системы четырех связанных нелинейных осцилляторов (модель Лавровой-

Ванага для системы Белоусова-Жаботинского) при различных видах связи. Детально исследованы динамические режимы как функции силы связи и соответствующей времени задержки и построены детальные карты разбиения параметрического пространства. В качестве особо положительного момента следует отметить, что при моделировании использовались размерные концентрации реагентов в реалистичном интервале их изменения, что дало возможность верификации выявленных закономерностей в натурном эксперименте. Заключительная часть главы посвящена элементам теории, объясняющей качественные причины, приводящие к ряду выявленных закономерностей для трех рассмотренных видов связи на основе упрощенной концепции связанных фазовых осцилляторов.

**Содержание второй главы** является непосредственным и естественным продолжением первой в качестве верификации сделанных теоретических и модельных предсказаний и представляет результаты экспериментального исследования различных динамических режимов химических автоколебаний связанных элементов, в каждом из которых протекает реакция Белоусова-Жаботинского. В качестве примера выбран один из рассмотренных типов связи - односторонняя связь четырех осцилляторов - который обеспечивает наиболее наглядную натурную реализацию. Убедительно подтверждено существование четырех основных режимов синхронизации, ранее выявленных и проанализированных в ходе численного моделирования. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента описаны с достаточной подробностью, убеждающей в их надежности. Сравнительный анализ модельных и экспериментальных результатов наглядно проиллюстрирован. Важной частью выполненного анализа является исследование стабильности допустимых динамических режимов и ее обсуждение в контексте реализации и поддержания соответствующих условий при практической реализации системы.

**Третья глава** обсуждает перспективы применения выявленных режимов динамики реакции Белоусова-Жаботинского в системе связанных химических элементов для построения концептуальной модели «химического компьютера», в определенной степени имитирующего работу малой нейрональной сети. Представлена блок-схема системы четырех связанных осцилляторов, посылающих сигналы возбудимым элементам анализирующего блока и модулю принятия решений. Характерной особенностью предложенной схемы, обладающей научной новизной, является разработка тех методов работы, которые опираются на фазовые и частотные отклики, что соответствует заявленной задаче имитации нейронального отклика в задачах классификации и принятия решений. Работоспособность предложенной схемы наглядно подтверждена представленными результатами численного моделирования,

базирующегося на обыкновенных дифференциальных уравнениях, с параметрами и решениями, согласующимися с соответствующими величинами реальной экспериментальной химической реакции.

Последняя, **четвертая глава** посвящена численному и экспериментальному моделированию переключений режимов связанных химических осцилляторов, что является важным в обсуждаемом контексте перспектив использования подобных систем для задач распознавания режимов по отклику химических автоколебаний на внешнее воздействие. Важной особенностью проведенной работы является то, что ряд характерных особенностей, выявленных в решении модельных уравнений системы Ванага-Эпштейна нашли свое подтверждение в реальном эксперименте, в частности вывод о том, что «силовой» метод переключения обеспечивает необходимые адресные переходы между любыми двумя режимами системы, существование которых допускается заданными параметрами. С практической точки зрения полезным является представленная автором таблица найденных допустимых переключений.

В **заключении** суммированы основные результаты и выводы по работе в целом.

Таким образом, диссертационная работа представляет законченное комплексное исследование с выдержанной логической последовательностью научного исследования, убеждающей в достоверности полученных результатов. Вместе с тем, изложение материала в тексте диссертации вызывает ряд замечаний:

- 1) существует путаница в части биологических и нелинейный динамических моделей, в частности режим возбудимости спутан с режимом релаксационных автоколебаний, противопоставление модели ФитцХью-Нагумо модели Ходжкина-Хаксли создает впечатление, что последняя, по мнению диссертанта, не описывает распространение нервного импульса (см. например, стр. 11-12);
- 2) аналогичным образом есть путаница между химическими и математическими уравнениями, в частности, система (R1)-(R10) приводится к виду уравнений (3)-(5) не за счет “упрощения”, а в силу того, что (3)-(5) есть непосредственное математическое выражение на основе закона действующих масс дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентраций веществ, входящих в реакции, записанные системой (R1)-(R10);
- 3) в расшифровке обозначение к уравнению (7) по всей видимости пропущена единица, вычитаемая из дельты Кронекера, так как последняя равна единице когда индексы совпадают и нулю - в остальных случаях, в

то время как соответствующий член (7) задает ненулевые взаимодействия именно между разными элементами сети;

- 4) ряд аналогий приведены чересчур “далеко и смело”, в частности, синфазная синхронизация трёх осцилляторов при отдельно колеблющимся четвертом представляет собой скорее не “легкий галоп” четвероного животного, а натуральную хромоту;
- 5) утверждение о цели работы в виде создания теории колебаний связанных небольших сетей осцилляторов в свете представленного содержания является преувеличенным - несмотря на отдельные элементы теории для отдельных режимов системы фазовых осцилляторов, в целом содержание работы состоит в приведении феноменологической детальной классификации выявленных эмпирических динамических режимов, оставляя разработку теории их возникновения для дальнейших исследований;
- 6) так как программа FlexPDE исходно работает с распределенными системами пространственно-временных дифференциальных уравнений, в работе следовало бы указать алгоритм введения искусственных пространственно-синхронизированных систем, динамика которых эквивалентна решениям ОДУ;
- 7) в силу приведенной во вводной части аргументации о недостатке классической вычислительной системы в виде шины обмена данными, чему противопоставляются вычисления на базе “химического компьютера”, в последней главе следовало бы обсудить вопрос о скорости и эффективности обмена данными между ячейками, играющими роль вычислительных элементов, при их практической физико-химической реализации.

Однако следует отметить, что указанные замечания и вопросы относятся прежде всего к тексту представленной диссертации, но не ставят под сомнение качество самих проведенных исследований и достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных из них выводов, их новизну и значимость. Подтверждением этому служит то, что они опубликованы в достаточном количестве статей в научных журналах, пользующихся заслуженной высокой репутацией и прошли апробацию на ряде крупных научных конференций, соответствующих как тематике диссертационного исследования, так и научному направлению автоколебаний и автоволн, оперирующему радиофизическими методами в целом.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа содержит всю необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов, удовлетворяет всем требованиям пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 01.10.2018, с изменениями от 26.05.2020), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Смелов Павел Сергеевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук (05.13.18 –  
Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ), доцент,  
профессор кафедры физики и нанотехнологий,  
заведующий отделом теоретической физики  
Научно-исследовательского центра физики  
конденсированного состояния  
Курского государственного университета



Постников Евгений Борисович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»). Почтовый адрес: ул. Радищева, 33, Курск, 305000  
Телефон: +7 (4712) 51-04-69; электронная почта: postnicov@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных

