

**Отзыв официального оппонента на диссертацию Федорова Евгения Георгиевича на тему «Математическое моделирование физико-химических процессов на основе метрических графов» на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**РАЗДЕЛ I. КОНСТРУКТИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ОТЗЫВА ОППОНЕНТА**

**1. Качество изложения материала / Quality of presentation**

высокая / high

**2. Полнота изложения научных результатов диссертации в основных публикациях, в которых излагаются основные научные результаты диссертации / Degree of completeness to which the scientific results of the thesis are presented in scientific publications**

исчерпывающая / satisfactory

**3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций / Degree to which the scientific assertions, conclusions, and guidelines are justified**

научные положения полностью обоснованы / scientific assertions are fully justified

**4. Практическая ценность диссертации / Practical significance of the thesis**

высокая / high

**5. Теоретическая ценность диссертации / Theoretical significance of thesis**

высокая / high

**6. Актуальность темы диссертации / Thesis topic relevance**

высокая / high

**7. Комментарий / Comments**

Материал работы изложен достаточно подробно и последовательно. Основные результаты представлены в достаточном количестве публикаций и выступлений на конференциях. Модели на основе дифференциальных уравнений используются в широком кругу прикладных задач от клеточных популяций до управления космическими аппаратами, что обеспечивает актуальность поставленной темы диссертации. Разработанный комплекс программ может применяться как в научно-исследовательских задачах, формировании и проверки гипотез, так и в практических, например, при анализе и предотвращении аварийных ситуаций различных технологических установок.

**РАЗДЕЛ II. ДИСКУССИЯ**

**Вопрос оппонента / Question**

В чем заключаются слабые места разработанного подхода для автоматической классификации аттракторов?

**Ответ соискателя / Applicant's answers**

При практическом использовании разработанного подхода основным недостатком является возможность пропуска аттрактора, если в его бассейн притяжения не попала ни одна начальная точка. Также недостатком, от части связанным с предыдущим, является время на анализ модели. На данный момент для увеличения шансов попадания в бассейн притяжения всех аттракторов берется большое количество начальных точек для траекторий (например, для рассматриваемых в работе моделей нейронных сетей при детальном поиске расчеты занимали до 2-ух суток на 11th Gen Intel Core i5 2.4GHz). Способом обхода описанных недостатков является проведение процедуры корреляции аттракторов (аналогично корреляции пластов в геологии). При этом подходе вместе с исследуемой динамической системой рассматриваются и системы с другими значениями параметров. Для каждой проводится процедура поиска и классификации аттракторов, а далее эти аттракторы сопоставляются между собой. Если в системе с другими

параметрами найден аттрактор, которому не удалось найти сопоставление в исследуемой системе, то проводится процедура прослеживания аттрактора до аттрактора в исследуемой системе или до бифуркации. Другим способом является визуализация векторного поля системы и предварительное определение наиболее интересных областей для перераспределения плотности начальных точек. Оба описанных выше подхода сейчас выполняются вручную при необходимости. Одним из возможных направлений развития текущего комплекса программ являются алгоритмы динамического подбора множества начальных точек и автоматической корреляции аттракторов в системах с разными значениями параметров (поиск пропущенных аттракторов).

#### **Вопрос оппонента / Question**

Предложенный алгоритм по определению типов предельного динамического поведения в системе для работы требует на вход заданной сетки начальных точек. Как осуществляется выбор исходной сетки и как это влияет на итоговый результат?

#### **Ответ соискателя / Applicant's answers**

Для выбора начальных точек сейчас применяется два подхода. При первом необходимо задать область (куб) фазового пространства и количество начальных точек, далее начальные точки будут взяты случайным образом из этого куба на основе метода Монте-Карло или латинского гиперкуба. При втором подходе необходимо задать область (куб) фазового пространства (или его подпространства для высокоразмерных или бесконечномерных фазовых пространств) и шаг деления для каждого измерения. На основе этого будет построена равномерная сетка начальных точек. Как уже частично было написано в предыдущем вопросе, для качественной классификации необходимо попадание начальных точек в как можно большее количество бассейнов притяжения аттракторов. В связи с этим определение начальных точек является важным шагом при поиске и классификации аттракторов. Способы повышения точности подхода описаны в предыдущем вопросе.

### **РАЗДЕЛ III. РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ОТЗЫВА ОППОНЕНТА**

#### **Актуальность / Relevance**

Математическое моделирование аттракторов является одним из важных инструментов в научных и технических исследованиях. Это позволяет предсказывать поведение систем в различных условиях, а также оптимизировать их работу. Однако, существующие методы математического моделирования не всегда обеспечивают достаточно высокую точность предсказаний, особенно в случаях сложных динамических систем. Математическое моделирование аттракторов находит свое применение в различных областях. Например, в физике это может быть моделирование движения тел, в химии -- реакции между различными веществами, в биологии -- моделирование поведения клеток и организмов, в экономике - прогнозирование динамики рынков и т.д. Это позволяет выявлять закономерности и предсказывать будущее поведение по моделям, что в свою очередь помогает принимать правильные решения и оптимизировать работу системы. Однако, для достижения высокой точности прогнозирования необходимо разработать новые методы и алгоритмы математического моделирования. Разработка новых методов и алгоритмов для повышения предсказательной способности математического моделирования аттракторов является актуальной задачей, которая позволит улучшить качество прогнозирования и повысить эффективность применения математического моделирования в различных областях науки и техники.

#### **Научная новизна / Scientific novelty**

Данная работа представляет новый комплексный подход к анализу динамических систем на основе дифференциальных уравнений с задержкой, обладающий научной новизной. Основные отличительные черты, подтверждающие новизну работы, включают: 1) Внедрение динамического шага интегрирования в модификации алгоритма Бенеттина

для расчета спектра Ляпунова бесконечномерных систем. 2) Идентификация нулевых показателей Ляпунова при расчете спектра Ляпунова. 3) Введение ряда показателей аттракторов, отвечающих за их расположение в фазовом пространстве. Кроме того, были построены математическая модель на базе комбинаторного графа и математическая модель на базе метрического графа, для которых был получен вывод об идентичности предсказаний по типу динамического поведения. В целом, данная работа представляет значительный вклад в область математического моделирования и анализа динамических систем и обладает научной новизной.

#### **Обоснованность положений / Validity of assertions**

Для подтверждения обоснованности выносимых результатов, были проведены сравнения с уже известными моделями и результатами исследований в данной области. Были проведены численные эксперименты, которые подтвердили правильность и эффективность разработанных подходов и моделей. Кроме того, проведенные аналитические исследования и численные эксперименты позволили убедиться в согласованности и соответствии полученных результатов с ожидаемыми теоретическими выводами. Для подтверждения научной новизны работы были проведены сравнения с ранее опубликованными результатами исследований в данной области. Разработанные модели и подходы к анализу динамических систем показали новые и интересные результаты. Это подтверждается публикациями в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, а также докладами на всероссийских и международных конференциях. Таким образом, результаты и положения, выносимые на защиту, обоснованы как теоретически, так и практически. Это подтверждается проведенными экспериментами, сравнениями с известными моделями и публикациями в рецензируемых научных изданиях.

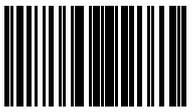
#### **Общая оценка работы / Overall assessment**

Поставленная в данной работе цель и решаемые конкретные задачи являются актуальными и востребованными как с теоретической точки зрения, так и с практической. Полученные результаты являются обоснованными и соответствующими начальной цели и задачам. Все результаты принадлежат лично автору работы. В ходе процедуры рецензирования автор предоставил развернутые, соответствующие вопросам, ответы. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявленным к кандидатским диссертациям.

#### **Заключение / Conclusion**

Соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук / Applicant is found deserving of the title of Candidate of Sciences

Официальный оппонент,  
кандидат физико-  
математических наук,  
доцент,  
федеральное  
государственное  
бюджетное  
образовательное  
учреждение высшего  
образования «Санкт-  
Петербургский  
государственный  
университет», доцент

Документ подписан	
Левин Сергей Борисович	

Левин Сергей

(Физический факультет)

10.12.2023

(эл. подпись оппонента)

Борисович

(Ф.И.О. оппонента)