

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Провоторова Вячеслава Васильевича на диссертацию Супрунова Игоря Ивановича на тему: «Математические модели и алгоритмы последовательной обработки движущихся протяженных объектов на основе окрестностных систем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ**

Окрестностная модель может быть интерпретирована как система на орграфе, каждая вершина которого снабжена набором переменных, при этом уравнения системы устанавливают зависимость этих переменных от переменных из вершин-источников для данной вершины. Статические и динамические окрестностные модели в настоящее время успешно используются для описания различных сложных технологических процессов и объектов. Динамические окрестностные модели обычно рассматриваются с точки зрения динамики свойств объекта во времени, при этом сам объект считается неподвижным или его движение в пространстве не имеет значения. В то же время имеется круг задач, в которых учет движение объекта в пространстве необходим. Таким образом, актуальной является задача построения динамических окрестностных моделей, включающих движение объекта в пространстве.

В диссертации Супрунова Игоря Ивановича определяется и изучается класс динамических окрестностных систем, позволяющих описывать процессы обработки движущихся объектов неподвижными устройствами. Практическое применение разработанных моделей и методов представлено приложениями к задаче принудительного охлаждения горячекатаной полосы в металлургии и к задаче равномерного снабжения ресурсами в логистике.

### **СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ**

Целью диссертационной работы являлась разработка и исследование математических моделей и алгоритмов последовательной обработки движущихся протяженных объектов с заданными целевыми параметрами выхода (то есть состояния после обработки) на основе методов окрестностного моделирования. В рамках данного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Построены общие окрестностные модели поступательного движения и обработки пространственного объекта в переменных Лагранжа и Эйлера, проведено сравнение данных моделей. Построение моделей в системах координатах Лагранжа и Эйлера осуществлялось в дискретном виде, при этом объект представляет собой твердое тело, который движется поступательно в пространстве. Изменение состояния объекта является результатом, во-первых, известного исследователю внутреннего детерминированного процесса и, во-вторых, результатом внешних управляющих воздействий в некоторой неподвижной области пространства при прохождении объектом этой области. Автор использует термины «пассивная» и «активная» обработка применительно к двум указанным случаям. По итогам построения моделей и их сравнения сделан вывод, что в координатах Лагранжа окрестностная система без управления (то есть при отсутствии активной обработки) имеет более простой вид, но в случае систем с управлением (с активной обработкой) более простой, с точки зрения задачи синтеза управления, будет окрестностная система в координатах Эйлера. Рассмотрен случай последовательной обработки движущегося протяженного объекта в координатах Лагранжа и Эйлера, который интерпретируется как поступательное движение одномерного протяженного объекта по прямой, построены соответствующие окрестностные структуры, рассмотрена запись соответствующей окрестностной системы в координатах Эйлера.

2. Для модели в переменных Эйлера разработаны алгоритмы расчета детерминированного и управляемого изменения параметров протяженного объекта на пассивных и активных участках последовательной обработки. Расчет на указанных участках осуществляется при помощи численных методов (пассивные участки) и алгоритма обработки (активный участок). По исходным данным осуществляется расчет на пассивных участках, полученные результаты используются для алгоритма обработки (управления) в активной зоне с целью получения векторов значений управляющих воздействий.

3. Построенная модель и разработанные алгоритмы адаптированы для применения в производственных задачах обработки протяженных объектов и в логистических задачах равномерного распределения поставок продукции потребителям. В задаче принудительного охлаждения горячекатаной полосы используется основной алгоритм обработки в активной зоне, для задачи логистики используется модификация алгоритма обработки, предусматривающая учет ограничений на ресурсы и позволяющая решать задачу равномерного расхода ресурсов.

4. Разработаны проблемно-ориентированные программные модули, реализующие алгоритмы расчета управляемого и детерминированного

изменения параметров протяженного объекта на активных и пассивных этапах последовательной обработки и позволяющие проводить вычислительные эксперименты. Разработанные программные модули реализуют расчеты в случае двух пассивных зон и заключенной между ними активной зоны, что дает возможность получить по исходному профилю (вектору) свойств протяженного объекта желаемый целевой профиль на выходе из зон обработки.

Применение данных моделей и алгоритмов для расчета режима работы душирующих установок в задаче охлаждения горячекатаной полосы и для расчета поставок продукции потребителям в задаче логистики показано в четвертой главе диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в теоретической части диссертации Супрунова Игоря Ивановича, базируются на корректном применении общепризнанных научных методов и положений, в частности, методов теории математического моделирования, теории систем, теории графов, вычислительной математики. В целом, содержание диссертационной работы как в теоретической, так и в практической части представляется обоснованным и достоверным.

## ДОСТОВЕРНОСТЬ И НОВИЗНА

Несомненной научной новизной характеризуются следующие результаты:

1. Введены классы динамических окрестностных моделей на основе использования переменных Лагранжа и Эйлера, что позволяет применять дискретные системы для описания процесса последовательной обработки движущихся протяженных объектов.

2. Разработаны алгоритмы и численные методы, отличающиеся использованием окрестностной модели Эйлера и позволяющие решать прямую и обратную задачи расчета изменения параметров протяженного объекта на пассивных этапах процесса обработки.

3. Разработан алгоритм расчета режимов работы последовательности однотипных управляющих устройств на активном этапе обработки, отличающийся возможностью учёта изменяющихся параметров объекта и позволяющий достигать заданных параметров выхода.

4. Предложены две модифицированные версии алгоритма последовательной обработки на активном этапе, отличающиеся возможностью учета ограничений на ресурсы управляющих устройств и позволяющие решать задачу равномерного расхода ресурсов.

5. Разработан проблемно-ориентированный комплекс программ, отличающийся наличием трех вычислительных модулей, соответствующих трем этапам обработки, и позволяющий находить режимы работы устройств

активной зоны, реализующие заданные целевые параметры выхода.

Достоверность результатов работы подтверждается проведенными в достаточном объеме исследованиями с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента. Разработанные методики, процедуры и алгоритмы были применены для исследования реальных объектов – получения технологически оптимального температурного профиля полосы на этапе смотки, а также для получения путевых кодов для последовательности транспортных агентов в задачах организации перевозок и логистики. Анализ полученных результатов во всех случаях показал соответствие производственным данным.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Теоретическая значимость результатов работы заключается в построении динамических окрестностных моделей поступательного движения и обработки пространственных объектов в системах координат Лагранжа и Эйлера. Полученные результаты позволяют использовать построенные динамические окрестностные модели и разработанные для них алгоритмы для описания процесса последовательной обработки движущихся протяженных объектов.

Считаю, что заключение диссертанта о теоретической значимости его работы, представленное в соответствующих разделах диссертации и автореферата соответствует научному уровню полученных результатов.

### ЦЕННОСТЬ ДАННОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ПРАКТИКИ

Практическая значимость результатов работы заключается в адаптации построенных моделей и разработанных алгоритмов для применения в производственных задачах обработки протяженных объектов и логистических задачах равномерного распределения поставок продукции. Результаты работы рекомендованы для дальнейшего рассмотрения и использования предприятиями АО «Липецкцемент», СП «Хмелинецкий сахарный завод» АО «АПО «Аврора», ООО «ЛипецкНИЦстройпроект», ООО «Группа Компаний «ЛипецкПрофиль», ПАО «НЛМК». В частности, в ПАО «НЛМК» подтверждено, что результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для дальнейшего рассмотрения и использования при анализе работы установки ускоренного охлаждения с целью получения технологически оптимального температурного профиля полосы на этапе смотки. Для ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» подтверждено, что на основе разработанных моделей и алгоритмов можно улучшить некоторые стадии процесса перевозки дорожно-строительных материалов.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном

процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» в рамках образовательной программы по направлению 01.03.03 «Механика и математическое моделирование» при выполнении индивидуальных заданий по дисциплинам «Математическое моделирование», «Применение компьютерных технологий в динамике систем тел», а также при подготовке выпускных квалификационных работ.

## ЗАМЕЧАНИЯ

1. В первой главе в записи первого уравнения динамической дискретной системы 1.4 на стр. 15 последовательность моментов времени в левой и правой частях формулы указана неточно: должно быть  $t + 1, t, t$ , а не  $t, t - 1, t$ .

2. В первой главе на странице 18 в описании нечетких билинейных окрестностных моделей с помощью матрицы структуры не сказано явно, какие значения могут принимать элементы матрицы структуры.

3. Во второй главе в описании динамических окрестностных моделей поступательного движения в параграфе 2.1 используется понятие динамической окрестностной структуры, которое определяется только в следующем параграфе 2.2. Возможно, в тексте диссертации следовало бы поменять местами эти параграфы или дать предварительную информацию.

4. В третьей главе название параграфа «Алгоритм получения целевого выходного профиля в результате аддитивной обработки в активной зоне», возможно, следовало бы сократить до «Алгоритм получения целевого выходного профиля», поскольку предварительные расчеты для профилей входа и выхода в активную зону входят в алгоритм как составные части.

5. Замечание по главе 4. Судя по описанию в третьей главе, по предлагаемому алгоритму можно рассчитывать любой заданный заранее профиль температур смотки (а не только возрастающий или убывающий, как указывается в п. 4.2.1). Возможно, об этом следовало бы сказать в данном пункте.

Приведенные замечания не влияют на корректность и важность полученных результатов и не препятствуют следующему положительному заключению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Супрунова Игоря Ивановича «Математические модели и алгоритмы последовательной обработки движущихся протяженных объектов на основе окрестностных систем» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Работа содержит решение научных задач, имеющих значение для развития теории

математического моделирования и теории окрестностных систем.

Содержание диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым Положением ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Материал диссертации изложен ясно, работа хорошо структурирована.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные научные результаты достаточно полно отражены в 15 публикациях, в том числе в 4 по Перечню изданий ВАК.

Диссертация «Математические модели и алгоритмы последовательной обработки движущихся протяженных объектов на основе окрестностных систем» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, автор диссертации Супрунов Игорь Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Я, Провоторов Вячеслав Васильевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры уравнений в частных  
производных и теории вероятностей  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Воронежский государственный университет»

В.В. Провоторов

« 19 » декабря 2024 г.

Провоторов Вячеслав Васильевич  
тел.: 8 950-758-15-14, e-mail: wwprov@mail.ru  
Адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1,  
ФГБОУ ВО «ВГУ», математический факультет,  
кафедра уравнений в частных производных и теории вероятностей



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный университет»

тилье 2  
ряду 3

3,