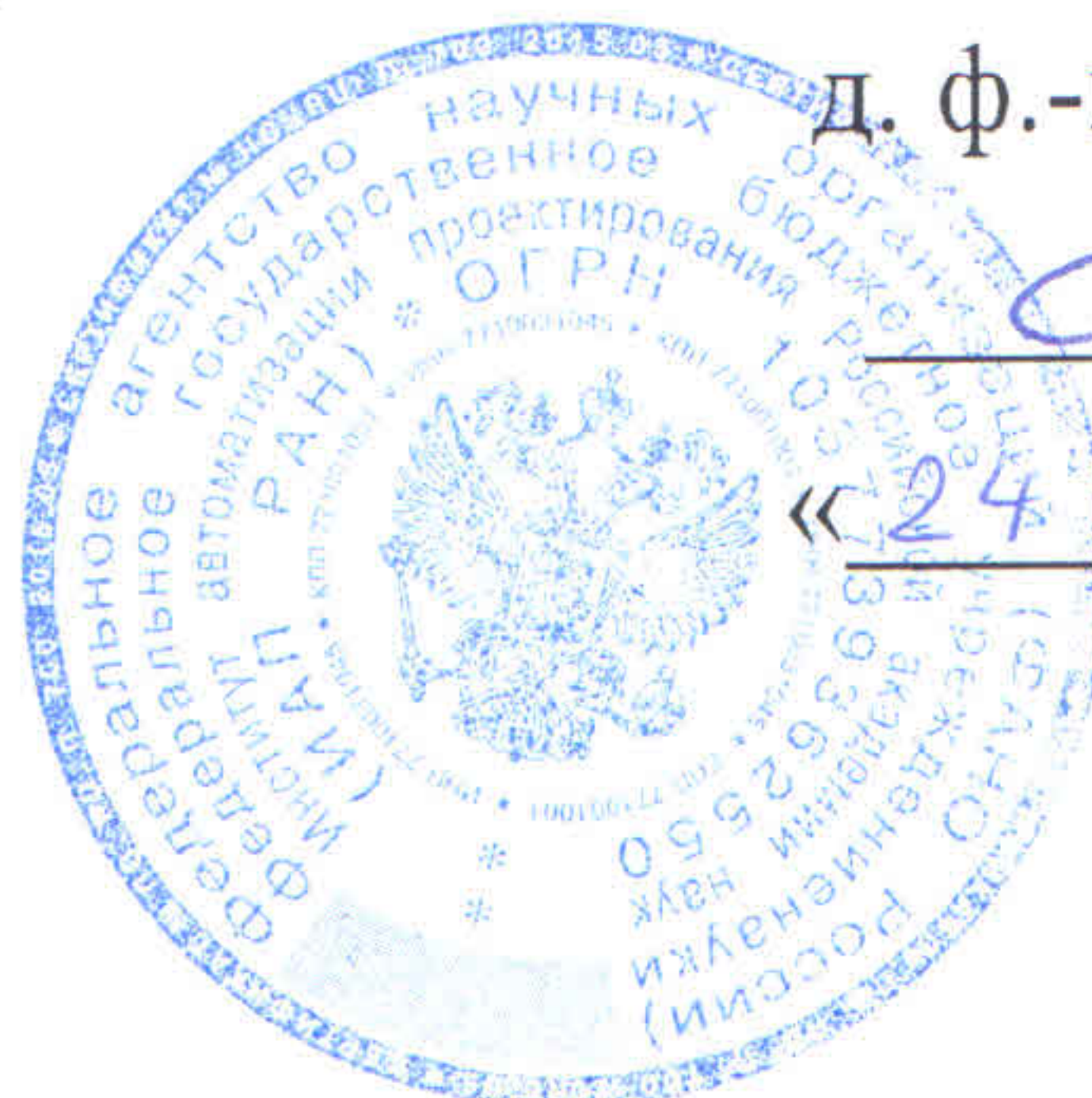


Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**Институт автоматизации  
проектирования  
Российской академии наук**  
(ИАП РАН)

123056, Москва, ул. 2-ая Брестская, д.19/18  
Телефон: 499 250-02-62  
Факс: 499 250-89-28  
e-mail: [icad@icad.org.ru](mailto:icad@icad.org.ru)

от 25.04.19 № 2171-185  
на № \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИАП РАН  
д. ф.-м. н. НИКИТИН И.С.

«24» апрель 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кленова Сергея Львовича «Стохастические математические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

#### Актуальность темы диссертации

Для эффективного регулирования и управления транспортными потоками, организации движения, оптимального распределения трафика по сети, а также для задач безопасности движения автомобилей в транспортном потоке, необходимо понимание природы появления дорожных заторов, что может быть использовано в работе интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые должны повысить безопасность дорожного движения и увеличить мобильность АТС. Практическая разработка интеллектуальных транспортных технологий сопряжена с большими материальными затратами. Поэтому предварительный анализ их эффективного использования в численных экспериментах является необходимым. Следовательно, должны быть разработаны надежные модели для численного моделирования транспортных потоков, которые давали бы хорошее согласие с эмпирическими данными.

Эмпирические наблюдения показывают, что транспортные заторы обнаруживают достаточно сложные пространственно-временные свойства. Такими пространственно-временными свойствами заторов в транспортном потоке являются например следующие: разнообразие пространственно-временных структур плотного транспортного потока, измеренных около узкого места (бутылочного горла) на автодороге; нелинейная эволюция этих структур плотного транспортного потока во времени и пространстве, сложные пространственно-временные явления, связанные со структурами плотного транспортного потока, возникающего вблизи двух или более примыкающих друг к другу узких мест на автодороге; трансформация между различными структурами плотного транспортного потока, которая происходит из-за фазовых переходов между различными фазами транспортного потока, и т.п.

В эмпирических исследованиях транспортных потоков дорожный затор обычно возникает в результате перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге. Наиболее важным эмпирическим свойством перехода к заторному транспортному потоку является метастабильность такого перехода, обнаруженная в реальных эмпирических данных. Доказательством такой метастабильности является, в частности, наблюдаемый в эмпирических данных фазовый переход от свободного к плотному потоку вблизи узкого места. Такой переход наблюдается, когда локальная структура плотного потока, которая первоначально возникла вдали от рассматриваемого узкого места, в дальнейшем распространяется по автодороге, достигает узкого места, вблизи которого наблюдается исходный свободный поток, и вызывает в этом свободном потоке индуцированный переход к плотному потоку.

Чтобы объяснить метастабильную природу перехода от свободного к плотному транспортному потоку, в частности, наблюдаемый в эмпирических данных индуцированный переход, Кернер ввел теорию трех фаз. Однако теория трех фаз является качественной теорией, которая состоит из системы гипотез. Диссертация Кленова Сергея Львовича посвящена разработке математических моделей транспортного потока в рамках теории трех фаз, разработке алгоритмов для имплементации этих моделей и соответствующего программного комплекса, а также дальнейшего применения этого программного комплекса в вычислительных экспериментах по моделированию интеллектуальных транспортных алгоритмов. Показано, что эти модели могут воспроизводить все известные к настоящему времени эмпирические пространственно-временные характеристики перехода к плотному потоку и возникающего транспортного затора.

### **Краткий анализ содержания работы**

Структура диссертации включает введение, 5 глав, заключение и список литературы.

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены основные цели и направления исследований. На защиту выносятся 5 положений. В Главе 1, которая носит обзорный характер, рассмотрены эмпирические свойства транспортного потока. Основная цель этих исследований показать, что эмпирический переход от свободного к заторному потоку обладает метастабильной природой. В Главе 1 объясняются также основные гипотезы трех фаз разработанные Кернером в конце 90-х годов. Эмпирическое обоснование теории трех фаз, рассмотренное в этой главе, позволяет объяснить принципы построения стохастических моделей в рамках теории трех фаз, рассмотренных в следующих главах диссертации. В Главе 2 разработан подход клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз. В Главе 3 разработана стохастическая микроскопическая модель транспортного потока в рамках теории трех фаз. Было показано, что в разработанной стохастической микроскопической модели в рамках теории трех фаз переход от свободного к плотному потоку - это переход от метастабильного свободного потока к синхронизованному потоку, как наблюдается во всех эмпирических данных. В Главе 4 были разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока. В Главе 5 разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий, а также проведены вычислительные эксперименты по моделированию пространственно-временных структур транспортного потока и интеллектуальных транспортных технологий.

на основе разработанного комплекса программ. В заключении сформулированы выводы диссертации.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность представленных в диссертации результатов численного моделирования и основанных на них выводов обусловлена тем, что разработанные модели и комплексы программ проверялись путем сравнения их результатов с результатами измерения реальных транспортных потоков, а также верифицированы на численном моделировании широкого круга задач. В частности, надежность результатов диссертации доказана в численных экспериментах по коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, сложного гетерогенного транспортного потока, предупреждения водителей о пробках, перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре. Кроме того, достоверность результатов диссертации была подтверждена в компании Даймлер. Можно констатировать, что сформулированные в диссертации выводы и рекомендации приводятся обоснованно.

### **Оценка новизны, научной и практической значимости проведенных исследований**

Новыми научными результатами являются следующие:

1. Разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к заторному транспортному потоку.
2. На основе разработанных моделей исследованы свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке и диаграмма этих структур, которые описывают их известные сочетания, наблюдаемые в реальных измерениях транспортного потока.
3. В рамках теории трех фаз разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.
4. В рамках теории трех фаз проведены вычислительные эксперименты, которые позволили провести тестирование следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Практическую ценность представляют разработанные алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий. На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили провести тестирование указанных интеллектуальных транспортных технологий. Кроме того, результаты диссертации и, в частности, комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий были использованы в компании Даймлер для проведения численных экспериментов по следующим задачам: 1) управление потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу, 2) управления скоростным режимом, 3) распределения трафика по

транспортной сети, 4) анализ потребления топлива в транспортных сетях, 5) оценки эффективности работы системы адаптивного круиз-контроля.

Результаты и выводы диссертации могут быть рекомендованы для использования при создании комплексов программ по моделированию больших транспортных сетей с целью кратковременных прогнозов, для численных экспериментов по проверке эффективности новых транспортных технологий управления транспортными сетями, изучения методов распределения АТС в сетях, в том числе индивидуального распределения, связанного с различными характеристиками транспортных средств, таких как легковые и грузовые АТС, автономные АТС, АТС с электрическим двигателем.

### **Полнота опубликования и апробация результатов исследования**

Результаты диссертации достаточно хорошо представлены в высокорейтинговых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов докторских диссертаций, в том числе входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science, а также в других рецензируемых изданиях. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских научных конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Автором в работе рассмотрены только микроскопические модели транспортных потоков. В то же время в литературе широко представлены макроскопические модели транспортного потока, в частности, гидродинамические модели. При этом в тексте работы нет обоснования данного выбора, сделанного автором.
2. На сегодняшний день существует большое число моделей транспортного потока, которые отталкиваются от его двухфазного представления. В частности, есть класс макроскопических моделей на основе модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса. Существуют также микроскопические модели, которые хорошо воспроизводят классическую неустойчивость транспортного потока, впервые использованную в моделях группы Джeneral Моторс. В работе подробно не рассматривается вопрос, можно ли от более сложных трех фазовых моделей, разработанных в диссертации, сделать переход к этим моделям и при каких условиях он будет обоснован.
3. Из текста диссертации не вполне ясно, как обеспечивался подбор параметров микроскопических моделей, предложенных автором во второй и третьей главах. Также не представлены расчеты, которые бы сравнивали возможности трехфазной модели клеточных автоматов с трехфазной стохастической моделью.
4. В разделе 3.5 работы автором утверждается, что «Никакая классическая модель транспортного потока, не может описывать эмпирической метастабильности свободного потока по отношению к переходу к синхронизованному потоку». Считаю необходимым заметить, что данное утверждение следует скорректировать следующим образом: «Никакая двухфазная классическая модель транспортного потока, не может описывать эмпирической метастабильности свободного потока по отношению к переходу к синхронизованному потоку». Поскольку уже есть работы, показывающие, что трехфазные макроскопические модели вполне успешно описывают этот переход.

5. В пятой главе автором проводилось исследование численного моделирования ad-hoc сети коммуницирующих автомашин с использованием оригинальной модели коммуникации между автомобилями, разработанной автором. Было бы интересно увидеть сравнение результатов работы авторской модели с результатами, полученными с использованием специализированного программного средства имитационного моделирования сетей ns-3, являющимся на сегодняшний день универсальным средством сетевых исследований.

Приведенные замечания не снижают научную и практическую значимость работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

### Заключение

Диссертационная работа Кленова С.Л. представляется законченным научным исследованием на актуальную тему, содержащим большое количество идей и предложений, реализованных в решении конкретных задач. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Основные результаты работы и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация показывает, что автор имеет высокую математическую культуру и может самостоятельно проводить полномасштабное научное исследование от анализа проблемы и постановки задач до создания новых математических моделей, разработки численных методов их решения, реализации их в виде программ, проведения объемного численного эксперимента и его сопоставления с данными измерений. На основе рассмотрения диссертации, автореферата и публикаций автора можно сделать вывод, что в работе Кленова С.Л. создан большой научный задел по направлению «Стохастические математические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз». Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как серьёзное научное и практическое достижение в области численного моделирования транспортных потоков. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (с изменениями на 1 октября 2018 года) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Кленов Сергей Львович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре отдела информатизации, математического моделирования и управления ИАП РАН, протокол № 1 от 18 апреля 2019 г.

Главный научный сотрудник  
Доктор технических наук



/ Гайдаенко Валерий Иванович /