

## ОТЗЫВ

**официального оппонента** 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»

Довольно продолжительное время проблема автомобильного движения является одной из главных для мегаполисов. Массивные заторы влекут не только потери времени, но и экономические потери. Оптимизации движения транспорта в мегаполисе уже стала одной из ключевых урбанистических задач, и все большую роль в её решении играет математическое моделирование, позволяющее учесть разные параметры городской жизни. Математические модели, используемые для анализа транспортных потоков, разнообразны по формулируемым задачам, математическому аппарату, используемым параметрам и степени детализации в описании движения. Изучать эту проблему начали уже более ста лет назад, однако в физике транспортных потоков и поныне много неясного. Понимание природы появления дорожных заторов поспособствует повышению безопасности движения, поможет в эффективном регулировании и управлении транспортными потоками, позволит оптимально распределить трафик по сети.

Понять физику транспортных процессов можно лишь исходя из анализа эмпирических данных. В эмпирических исследованиях транспортных потоков дорожный затор обычно возникает в результате перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи сужения (*bottle neck*) на автодороге. Наиболее важным свойством перехода к плотному транспортному потоку является метастабильность такого перехода, обнаруженная в реальных эмпирических данных.

Для объяснения метастабильной природы перехода к плотному транспортному потоку, в 1998 году Кернер Б.С. ввел качественную теорию трех фаз. Однако, для проведения моделирования транспортных потоков и интеллектуальных транспортных систем (ИТС) требовалось создать математические модели в рамках этой теории, которые продемонстрируют эмпирически наблюдаемую метастабильность перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи сужения на автодороге, а также смогут моделировать результирующие структуры плотного транспортного потока, которые наблюдаются в реальности. Основными задачами диссертации Кленова С.Л. являются: 1) разработка моделей транспортного потока в рамках теории трех фаз, 2) разработка алгоритмов численного моделирования транспортного потока на основе этих моделей, 3) проведение численных экспериментов по моделированию свойств транспортного потока, а также различных ИТС приложений. Поэтому **актуальность** данной диссертационной работы определяется самой ситуацией сегодняшнего дня и насущными транспортными задачами, которые усложняются буквально каждый день.

Диссертация Кленова С.Л. посвящена разработке математических моделей транспортного потока и их применению для численных экспериментов по моделированию интеллектуальных транспортных технологий. В диссертации не только разработаны математические стохастические модели транспортного потока, но и показано, что эти модели могут воспроизвести все известные к настоящему времени эмпирические пространственно-временные характеристики перехода к плотному потоку и возникающего транспортного затора. Кроме того, разработанные в диссертации модели применяются для численных экспериментов по моделированию различных интеллектуальных транспортных систем. Разработка интеллектуальных транспортных

технологий считается одной из ключевых задач будущего развития транспортных систем во всех ведущих индустриальных странах мира. Поскольку внедрение ИТС процесс дорогостоящий, он должен предваряться тщательным анализом и численным моделированием такой технологии.

Применение методов управления транспортными потоками, оптимизация распределения трафика по сети, кооперативного движения и других интеллектуальных транспортных технологий должно, в частности, помочь предотвратить возникновение транспортных заторов, или же минимизировать время их жизни и протяженности. Поэтому любая теория транспортных потоков, применяемая при разработке автоматических машин, надежных методов динамического распределения и управления транспортными потоками, и других ИТС должна быть совместима с эмпирическими свойствами возникновения транспортных заторов на автодорогах.

Остановимся вкратце на содержании диссертационной работы. Диссертация Кленова С.Л. состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 268 страниц.

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и приведено краткое изложение основных разделов диссертации. На защиту выносятся 5 результатов (положений).

В **главе 1** дан обзор классических моделей транспортного потока и описаны исследования в области теории и численного моделирования транспортных потоков, проводимые в России. В этой главе рассмотрены известные эмпирические свойства потока и показано, что эмпирический переход от свободного к плотному потоку обладает метастабильной природой. Далее следует изложение основного предположение теории трех фаз Кернера для описания этого перехода. Метастабильная природа эмпирического перехода от свободного потока объясняет, почему необходимо использовать теорию трех фаз для разработки таких моделей транспортного потока. С другой стороны, реальный транспортный поток – это сложный стохастический процесс. Поэтому разумно для его моделирования разрабатывать стохастические модели в рамках теории трех фаз. Эти эмпирические свойства транспортного потока определяют тему диссертации. В этой же главе объясняются основные гипотезы трех фаз разработанные в конце 1990-х. 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.

**Глава 2** посвящена подходу клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз. Представлены модель поведения водителей и правила движения для модели КА. В рамках разработанной модели КА продемонстрированы спонтанный и индуцированный фазовые переходы к плотному потоку, рассчитана вероятность спонтанного перехода к плотному потоку вблизи въезда, найдены решения в виде всех трех фаз транспортного потока. Рассмотрено также отличие классического подхода к моделям клеточных автоматов для транспортного потока (*Nagel-Schreckenberg* КА модели) от разработанной в диссертации моделью клеточных автоматов в рамках теории трех фаз.

В **главе 3** разработана стохастическая микроскопическая модель транспортного потока в рамках теории трех фаз, которая в дальнейшем используется для моделирования метастабильного фазового перехода к плотному потоку и возникающих пространственно-временных структур в транспортном потоке. Приведены правила для движения автомашин на въездах и съездах, которые позволили уменьшить минимальные флуктуации скорости при больших потоках автомашин.

**Глава 4** посвящена численному моделированию фазовых переходов и пространственно-временных структур плотного транспортного потока на основе стохастической микроскопической модели, представленной в главе 3. В частности, найдена двойная Z-характеристика для фазовых переходов, рассчитана диаграмма и найдены основные типы пространственно-временных структур плотного транспортного потока, смоделировано индуцированное образование и проанализирована эволюция пространственно-временных структур, возникающих вблизи сужения автодороги.

**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. Приведено свидетельство о применении разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий в компании *Daimler* в Германии.

**В Заключении** сформулированы основные результаты диссертации. Библиография включает 334 наименования.

Среди **новых научных результатов** можно выделить следующие:

- Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.
- Впервые на основе разработанных моделей найдены свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке, построена диаграмма этих структур, в результате получено описание всей известной совокупности пространственно-временных структур, наблюдаемых в реальных измерениях транспортного потока.
- В рамках теории трех фаз впервые разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.
- В рамках теории трех фаз впервые проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество различных интеллектуальных транспортных технологий.

**Достоверность** представленных в диссертации результатов численного моделирования и вытекающих из них выводов обусловлена применяемыми современными математическими методами и хорошей согласованностью эмпирических данных и численного моделирования. Все разработанные модели и комплексы программ были надежно и тщательно проверены на широком круге задач, кроме того, сделано сравнение результатов моделирования пространственно-временных структур транспортного потока с эмпирическими данными измерения таких структур.

В частности, надежность результатов диссертации доказали численные эксперименты 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, надежность результатов диссертации была подтверждена в компании *Daimler*.

**Практическую ценность** представляют разработанные алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий. На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: 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. Некоторые результаты диссертации, в частности, комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий, были использованы в компании *Daimler* для проведения численных экспериментов по следующим интеллектуальным транспортным технологиям: для управления потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу; для управления скоростным режимом; для распределения трафика по транспортной сети; для потребления топлива в транспортных сетях; для оценки системы адаптивного круиз-контроля.

Все представленные в диссертации результаты получены автором **самостоятельно или при его непосредственном участии**. Во всех проведенных исследованиях автор принимал участие в постановке задач, разработке методов их решения и анализе результатов.

Результаты данной диссертационной работы достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях – 38 работ в научных изданиях, рекомендованных ВАК. Они неоднократно обсуждались на научных семинарах, профильных российских и международных научных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Характеризуя диссертацию в целом, отметим, что она выполнена на весьма высоком научном уровне.

Диссертация не свободна от некоторых недостатков.

Нельзя не признать определенной небрежности в изложении результатов и оформлении диссертации. Ссылки на литературу идут не в хронологическом порядке; в тексте диссертации ссылки на российских исследователей оформлены не совсем корректно (отсутствуют инициалы); нет разделения целей и задач; пункты «методы исследования» и «теоретическая ценность» диссертационного исследования присутствуют в работе неявно, но при этом в автореферате о них упоминается отдельными пунктами, и т.д.

- В работе рассмотрены только стохастические модели транспортных потоков. В научной литературе имеется огромное количество детерминистических моделей потока, которые исследователи применяют для различных приложений. Не очень понятно, почему в диссертации автор ограничился стохастическими моделями транспортного потока в рамках теории трех фаз, проигнорировав детерминистические модели.
- Нет указаний на то, какие эмпирические данные использовались для проверки моделей и выбора параметров модели.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты. Эти замечания никоим образом не снижают ценности диссертации и ее высокой оценки.

## Заключение.

Существенных замечаний нет, диссертационная работа выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне.

Автор продемонстрировал высокий уровень владения математическим аппаратом и методами численного моделирования. Кленов С.Л. внес значительный вклад в разработку теории и моделей транспортных потоков и численного моделирования перспективных интеллектуальных транспортных технологий, фактически заложены основы для нового научного направления. Результаты диссертации можно оценить как научное достижение в области теории и методов математического моделирования транспортных потоков.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции на 1 октября 2018 года) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Кленов С.Л. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
Заведующий теоретическим отделом  
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

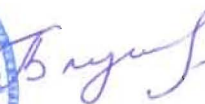
119991, ГСП-1, Москва,  
ул. Вавилова, д. 38,  
Телефон: +7 (499) 503 8777 (доб.747)  
E-mail: ngus@mail.ru



Гусейн-заде Н.Г.

26.04.2019

Подпись Гусейн-заде Н.Г. заверяю  
ВРИО Ученого секретаря  
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
доктор физико-математических наук



Глушков В.В.