

Научная статья  
УДК 625.096:656.11  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>  
EDN: WFXWJF



## ТРЕХФАЗНАЯ ТЕОРИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ Б. КЕРНЕРА И ЕЕ СРАВНЕНИЕ С КЛАССИЧЕСКИМИ ДВУХФАЗНЫМИ ТЕОРИЯМИ

**А.В. Бордуков**

Тульский государственный университет,  
г. Тула, Россия  
[av.bordukov@gmail.com](mailto:av.bordukov@gmail.com)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В данной публикации проводится сравнительный анализ двухфазной и трехфазной теорий транспортных потоков. Рассматриваются ключевые отличия между этими теориями, их применимость к реальным транспортным системам, а также фазовые переходы, учитываемые моделями теорий. Основное внимание уделяется эмпирическим данным и моделированию сложных динамических явлений на дорогах. В статье подчеркивается научная новизна трехфазной теории Б. Кернера, ее преимуществ в прогнозировании заторов и управлении транспортными потоками.

**Материалы и методы.** В исследовании рассмотрены и проанализированы классические теории транспортного потока, включая двухфазные модели, основанные на фундаментальной диаграмме, и трехфазная теория транспортного потока, разработанная Б. Кернером. Основное внимание уделялось теоретическим аспектам, сравнительному анализу и интерпретации ключевых положений этих теорий. Исследование базировалось на анализе научной литературы. Основными источниками информации служили рецензируемые статьи, опубликованные в ведущих научных журналах по транспортной тематике, монографии, посвященные теории транспортных потоков и их применению в управлении движением, доклады и материалы международных конференций, а также иные источники, охватывающие как классические подходы, так и современные тенденции в моделировании транспортных потоков.

**Результаты.** Сделан сравнительный анализ общей двухфазной теории транспортного потока и трехфазной теории транспортного потока Б. Кернера. В двухфазной теории, базирующейся на фундаментальной диаграмме трафика, основными фазами являются свободный и плотный потоки. Эти фазы описываются через взаимосвязь между плотностью, потоком и скоростью движения автомобилей. Фазовый переход в двухфазной теории возникает из-за превышения критической плотности транспортных средств. Трехфазная теория описывает несколько фундаментальных свойств фазовых переходов: от свободного к синхронизированному, от синхронизированного к широким кластерам, а также обратные переходы и их различные варианты.

**Обсуждение и заключение.** Основные результаты исследования заключаются в детализированном сравнении двух теорий, что позволяет выявить критические аспекты и потенциальные направления их дальнейшего развития. В частности, было показано, что трехфазная теория Кернера обладает более широкими возможностями для описания метастабильных состояний и сложных переходов между фазами, что делает ее предпочтительной для анализа транспортных потоков в условиях современных мегаполисов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** двухфазная теория, трехфазная теория, фундаментальная диаграмма, фазовая диаграмма, транспортные потоки, прогнозирование заторов, Б. Кернер

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор выражает благодарность научному руководителю И.Е. Агурееву за оказанную помощь в подготовке и написании публикации. Благодарность анонимным рецензентам и редакции журнала за обработку статьи и возможность ее опубликования.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 15.12.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Бордуков А.В., 2025



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Бордуков А.В. Трехфазная теория транспортных потоков Б. Кернера и ее сравнение с классическими двухфазными теориями // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 986-998. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

EDN: WFXWJF

## KERNER'S THREE-PHASE THEORY OF TRAFFIC FLOWS AND ITS COMPARISON WITH CLASSICAL TWO-PHASE THEORIES

**Anton V. Bordukov**  
Tula State University,  
Tula, Russia,  
[av.bordukov@gmail.com](mailto:av.bordukov@gmail.com)

### ABSTRACT

**Introduction.** This publication provides a comparative analysis of two-phase and three-phase theories of traffic flows. It considers the key differences between these theories and their applicability to real transport systems as well as the phase transitions taken into account by the theories' models. The main focus is made on empirical data and modeling complex dynamic phenomena on roads. The article highlights the scientific novelty of Kerner's three-phase theory and its advantages in congestion forecasting and managing traffic flows.

**Materials and methods.** The study examines and analyses classical theories of traffic flow, including two-phase models based on the fundamental diagram and the three-phase theory of traffic developed by B. Kerner. Main attention is paid to theoretical aspects, comparative analysis, and interpretation of key provisions of these theories. Study is based on analysis of scientific literature. The main sources of information have been peer-reviewed articles published in leading scientific journals on transport, monographs devoted to the traffic flow theory and its application in traffic management, reports and materials of the international conferences, and other sources covering both classic approaches and current trends in traffic flow modeling.

**Results.** A comparative analysis of the general two-phase theory of traffic flow and Kerner's three-phase traffic flow theory has been made. In two-phase model, based on the fundamental traffic diagram, the main phases are free flow and dense flows. These phases are characterized by the relationship between density, flow, and vehicle speed. In two-phase model the phase transition occurs when the critical vehicle density is exceeded. The three-phase model describes several fundamental properties of phase transitions: from free flow to synchronized flow, from synchronized flow to wide clusters and reverse transitions and their variants.

**Discussion and conclusion.** The main results of the study include a detailed comparison between two theories, allowing us to identify critical aspects and potential directions for further development. Specifically, it has been shown that Kerner's three-phase model offers greater capabilities for describing metastable states and complex transitions between phases, making it more suitable for analyzing traffic flows in modern megacities.

**KEYWORDS:** two-phase theory, three-phase theory, fundamental diagram, phase diagram, traffic flows, congestion forecasting, B. Kerner

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The author expresses gratitude to his supervisor Agureev I.Ye. for his support in preparing and writing this article, to The Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial board and the reviewers of the article for processing and ability to publish this study.

**The article was submitted: March 14, 2024; approved after reviewing: August 15, 2025; accepted for publication: December 15, 2025.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

**For citation.** Bordukov A.V. Kerner's three-phase theory of traffic flows and its comparison with classical two-phase theories. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 986-998. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-986-998>

© Bordukov Anton V., 2025



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 20-х годов предыдущего столетия, в связи с все возрастающим числом автомобилей, перед учеными встала задача оптимизации дорожного движения и повышения безопасности перемещения транспортных средств<sup>1</sup>. Для моделирования и прогнозирования дорожного движения был разработан ряд теорий транспортного потока. Несмотря на достижения в области вычислительной техники, универсально удовлетворительная теория, применимая к реальным условиям, остается недостижимой<sup>2</sup>. Текущие модели сочетают эмпирические и теоретические методы для прогнозирования трафика и определения зон заторов.

Началом становления теорий транспортного потока является появление независимых работ Лайтхилла и Уизема, в которых была предложена первая макроскопическая (гидродинамическая) модель однополосного транспортного потока, названная впоследствии моделью Лайтхилла-Уизема (Уитема)-Ричардса (LWR), в которой поток автомобилей рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. Часто эту модель называют моделью Лайтхилла-Уизема.

Классические теории транспортных потоков включают модель и различные модели следования за автомобилем, которые описывают взаимодействие транспортных средств в потоках. Одной из разновидностей модели LWR является модель Танака<sup>3</sup>. Другим важным шагом в становлении теории транспортных потоков стала модель, предложенная Пейном<sup>4</sup>.

Важным классом микроскопических моделей являются модели следования за лидером, считающиеся наиболее приближенными к действительному транспортному потоку.

В тот же временной период сотрудники концерна «Дженерал Моторс» Д. Газис, Р. Херман, Р. Потс<sup>5</sup> предложили одну из первых нетривиальных микроскопических моделей однополосного транспортного потока, с помощью которой можно получить фундаментальную диаграмму.

Альтернативная, трёхфазная теория дорожного движения Кернера предполагает наличие диапазона пропускной способности в узких местах, а не одного значения<sup>6,7</sup>.

Несмотря на широкое применение, классические теории транспортного потока, основанные на фундаментальной диаграмме транспортного потока, имеют свои ограничения, особенно в моделировании сложных динамических процессов, таких как внезапные заторы и метастабильные состояния [1].

Метастабильные состояния согласно Б. Кернеру – такие состояния транспортного потока, которые при относительно малых возмущениях состояния потока остаются устойчивыми, при больших возмущениях происходит фазовый переход.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью совершенствования моделей транспортных потоков, что особенно важно для разработки эффективных стратегий управления дорожным движением в условиях современных мегаполисов. В классических теориях, основанных на фундаментальной диаграмме, используется разделение загруженности транспортного потока на две фазы – фазу свободного потока и плотного. В этом контексте трехфазная теория Б. Кернера, предложенная в 1996 г., представляет собой значительный шаг вперед. В рамках этой теории происходит деление фазы плотного потока на две фазы – синхронизированный поток и

<sup>1</sup> Сильянов В.В., Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения // 2-е изд., перераб и доп. М., Орёл, Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. 331 с. ISBN 978-5-361-01336-4. EDN RRPXZL.

<sup>2</sup> Яшина М.В., Розентблат Г.М., Солиев Ю.С. [и др.]. Математические методы для управления дорожной инфраструктурой. коллективная монография в 2-х частях // Часть 1. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). 2021. 164 с. ISBN 978-5-7962-0280-7. EDN OIXHZG.

<sup>3</sup> Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983.

<sup>4</sup> Payne H.J. Models of freeway traffic and control. Simulation Council Proc. 28. Mathematical models of public systems / edited by G.A. Bekey. 1971. V. 1: 51 – 61.

<sup>5</sup> Gazis D.C. Traffic science. N.Y.: Wiley, 1974.

<sup>6</sup> Kerner, B.S. Three-phase traffic theory and highway capacity. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1999.

<sup>7</sup> Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. Berlin: Springer, 2009.

<sup>8</sup> Kerner B.S. The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features. Engineering Applications, and Theory. Springer, 2004.

широкий движущийся кластер (фаза затора). При эмпирическом анализе загруженности участка дороги это позволяет более детально моделировать реальные дорожные условия и предсказывать возникновение заторов с повышенной точностью.

Научная проблема заключается в необходимости сравнения двухфазной и трехфазной теорий с целью выявления их сильных и слабых сторон, а также определения наиболее перспективных направлений их дальнейшего развития. Развитие этой темы имеет большое значение как для теоретической транспортной науки, так и для практической деятельности в области управления дорожными потоками.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Общая схема исследования

В исследовании рассмотрены и проанализированы классические теории транспортного потока, включая двухфазные модели, основанные на фундаментальной диаграмме, и трехфазная теория транспортного потока, разработанная Б. Кернером. Основное внимание уделялось теоретическим аспектам, сравнительному анализу и интерпретации ключевых положений этих теорий. Цель заключалась в выявлении их сильных и слабых сторон, а также в оценке применимости к реальным транспортным системам.

Исследование базировалось на анализе научной литературы. Основными источниками информации служили рецензируемые статьи, опубликованные в ведущих научных журналах по транспортной тематике, монографии, посвященные теории транспортных потоков и их применению в управлении движением, доклады и материалы международных конференций, таких как «75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory. Greenshields symposium», а также учебные пособия и руководства, охватывающие как классические подходы, так и современные тенденции в моделировании транспортных потоков. Критериями отбора источников служили их научная значимость, актуальность и практическая применимость в контексте сравнительного анализа двухфазной и трехфазной теорий.

Процесс исследования включал поиск и отбор релевантной литературы. Использовались базы данных, такие как Scopus, Web of Science и Google Scholar. Для поиска научных публикаций применялись ключевые слова, включая *fundamental diagram*, *three-phase traffic theory* и *traffic flow models*. При отборе учитывались работы, опубликованные в период с 1955 по

2024 г., чтобы охватить как классические, так и современные исследования.

Изучение теоретических основ включало анализ двухфазных теорий с особым акцентом на модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) и её вариациях, описывающих зависимость между плотностью, скоростью и потоком. Для трехфазной теории Кернера внимание уделялось концепциям синхронизированного потока и широких движущихся кластеров, а также их эмпирической верификации. В ходе сравнительного анализа были выявлены ключевые различия между фундаментальной диаграммой и фазовой диаграммой Кернера. Особое внимание было уделено подходам к описанию фазовых переходов, включая метастабильные состояния и стохастическую природу заторов, а также рассмотрены области применимости теорий, такие как автомагистрали, городские условия и прогнозирование заторов.

Интерпретация результатов основывалась на классификации теорий с точки зрения их возможностей объяснять эмпирические наблюдения. Также были выделены практические аспекты применения каждой из теорий в управлении транспортными потоками. Для анализа использовался качественный подход, который позволил идентифицировать сильные и слабые стороны теорий. Анализ базировался на сопоставлении теоретических предположений с эмпирическими данными, доступными в литературе. В результате проведенной работы была сформирована сравнительная таблица с основными различительными особенностями теорий. Полученная информация структурирована для формирования четкой и последовательной картины сравнительных характеристик двухфазных и трехфазной теорий.

### История возникновения транспортных теорий

#### Двухфазные теории

Двухфазные теории транспортного потока возникли в середине XX в. и основываются на фундаментальной диаграмме, описывающей зависимость между плотностью и потоком транспортных средств.

В 1955 г. М. Лайтхилл, Дж. Уизем и независимо от них П. Ричардс (1956) предложили макроскопическую модель, описывающую транспортный поток по аналогии с потоком одномерной сжимаемой жидкости [2.3]. Эта модель, получившая название модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR), стала первой в мире гидродинамической (макроскопической) моделью.

Модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) и её многочисленные вариации занимают ключевое место в современных теоретических и прикладных исследованиях транспортных потоков, являясь основным инструментом для выполнения сложных расчетов [4.5]. Данная модель демонстрирует высокую эффективность в задачах оптимизации и регулирования движения транспортных средств<sup>9</sup>.

### **Трехфазная теория Б. Кернера**

Теория трех фаз была разработана Борисом Кернером в 1996–2002 гг. и базируется на обширных эмпирических данных, собранных на магистралях Германии. Кернер начал свою работу, анализируя большое количество данных о транспортных потоках, и обнаружил, что двухфазные модели не могут адекватно описать все наблюдаемые явления, такие как широкие движущиеся кластеры [6.7].

В 1990-х годах Кернер и его коллеги проводили детальные исследования транспортных потоков на различных магистралях. Они обнаружили, что стандартные двухфазные модели не могли объяснить ряд наблюдаемых феноменов, таких как внезапное возникновение и исчезновение заторов.

На основе собранных эмпирических данных Кернер разработал трехфазную теорию, которая включает в себя три состояния транспортного потока: свободный поток, синхронизированный поток и широкий движущийся кластер [8.9]. Эта теория была опубликована в ряде статей и монографий и нашла широкое признание в научном сообществе [4.6.7].

В настоящее время теория активно развивается для исследования динамики транспортных потоков [10-13].

### **Описание и ключевые особенности двухфазных теорий**

Двухфазные теории основаны на фундаментальной диаграмме транспортного потока и рассматривают транспортный поток как систему, переходящую между двумя основными фазами:

- **Свободный поток (F – Free flow):** низкая плотность, высокая скорость транспортных средств. В этом состоянии автомобили движутся практически независимо друг от друга, минимальные взаимодействия между ними.
- **Плотный поток (C – Congested flow):** высокая плотность, низкая скорость транс-

портных средств. В этом состоянии движение становится более организованным, водители начинают учитывать плотность потока и взаимодействовать друг с другом.

Фазовый переход между этими состояниями часто моделируется на основе критической плотности  $\rho_c$ , при достижении которой система переходит от свободного движения к перегруженному состоянию.

Фундаментальная диаграмма (рисунок 1) является ключевым элементом двухфазных теорий.

Она представляет собой график, который показывает соотношение между интенсивностью транспортных средств (количеством транспортных средств в час) и плотностью транспортного потока (количеством транспортных средств на километр). В двухфазных теориях фундаментальная диаграмма имеет следующий вид:

- при низкой плотности интенсивность потока возрастает с увеличением плотности, достигая максимума при критической плотности;
- после достижения критической плотности интенсивность начинает снижаться с дальнейшим увеличением плотности.

### **Описание и ключевые особенности трехфазной теории Б. Кернера**

Трехфазная теория Кернера выделяет три состояния транспортного потока и описывает их взаимодействие [14.15.16]. Ключевые особенности включают:

- **Механизмы переходов.** Трехфазная теория Кернера включает более сложные механизмы переходов между фазами, что позволяет лучше описывать динамическое поведение транспортных потоков на дорогах. Кернер ввел концепцию синхронизированного потока и широких движущихся кластеров, что позволило ему более точно моделировать реальные условия на дорогах.
- **Фазовая диаграмма.** В отличие от фундаментальной диаграммы в двухфазных теориях фазовая диаграмма в трехфазной теории Кернера учитывает три состояния транспортного потока и показывает, как изменения в плотности и скорости могут приводить к переходам между этими фазами. Она позволяет моделировать сложные динамические взаимодействия между различными фазами.

<sup>9</sup> Гасников А.В. [и др.]. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. Пособие // под ред. А.В. Гасникова. 2-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.

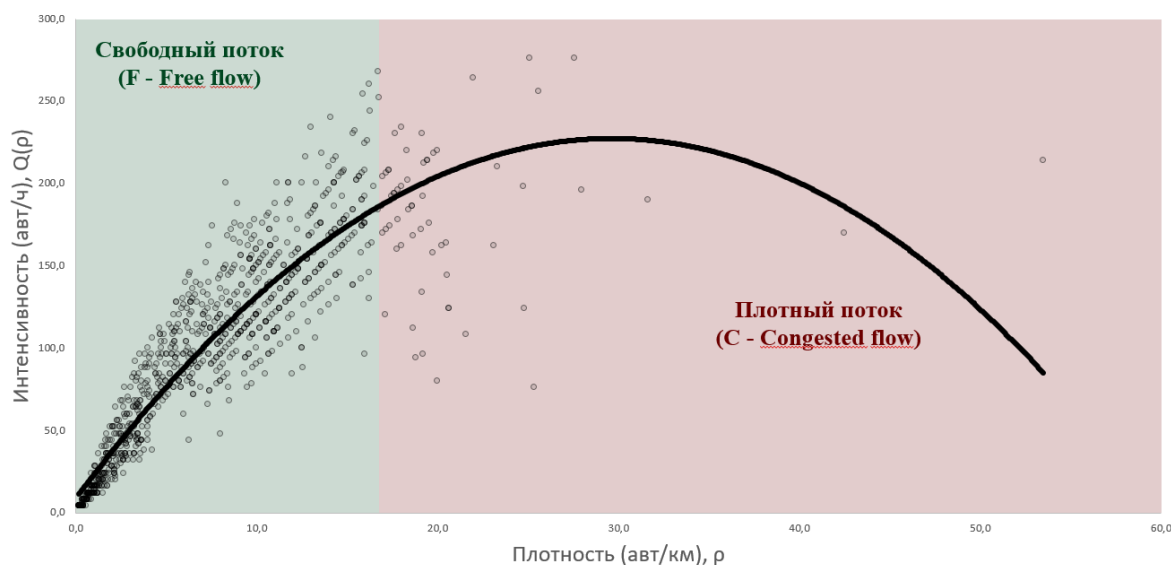


Рисунок 1 – Фундаментальная диаграмма

Источник: составлено автором на основе анализа данных с детекторов транспорта г. Тулы.

Figure 1 – Fundamental diagram

Source: compiled by the author on the analysis of data from transport detectors in Tula.

- **Эмпирическая основа.** Трехфазная теория Кернера базируется на обширных эмпирических данных, собранных с различных дорог. Это позволяет более точно описывать поведение транспортных потоков и предсказывать образование заторов.

Трехфазная теория Кернера представляет собой более комплексный подход, чем двухфазные модели. Ключевые аспекты теории включают:

- **Свободный поток (F – free flow):** Транспортные средства движутся с высокой скоростью, практически не влияя друг на друга.

- **Синхронизированный поток (S – synchronized flow):** Транспортные средства движутся с согласованной скоростью, плотность увеличивается, но поток остается стабильным.

- **Широкий движущийся кластер (J – wide moving jam):** Возникает при высокой плотности, скорость движения значительно снижается, возникает затор.

В трехфазной теории Б. Кернера графическое отображение фаз представлено в виде фазовой диаграммы (рисунок 2).

Линейные кластеры на графическом отображении возникают в связи с использованием округления скорости до целого при получении данных.

#### Сравнительный анализ двухфазной теории и трехфазной теории Б. Кернера

Одной из ключевых проблем классических двухфазных теорий является использование фундаментальной диаграммы для описания сложной динамики транспортных потоков, особенно в условиях плотного движения. В моделях, таких как модель Лайтхилла-Уизема, фундаментальная диаграмма построена на предположении, что связь между плотностью и потоком является гладкой (дифференцируемой). Однако эмпирические данные показывают, что в реальных дорожных условиях на средних уровнях плотности возникает «облако» точек, которое не поддается аппроксимации никакой кривой. Отсутствие жесткой зависимости между параметрами потока и плотности в реальных условиях делает стандартные модели на основе фундаментальной диаграммы неприменимыми для точного прогнозирования.

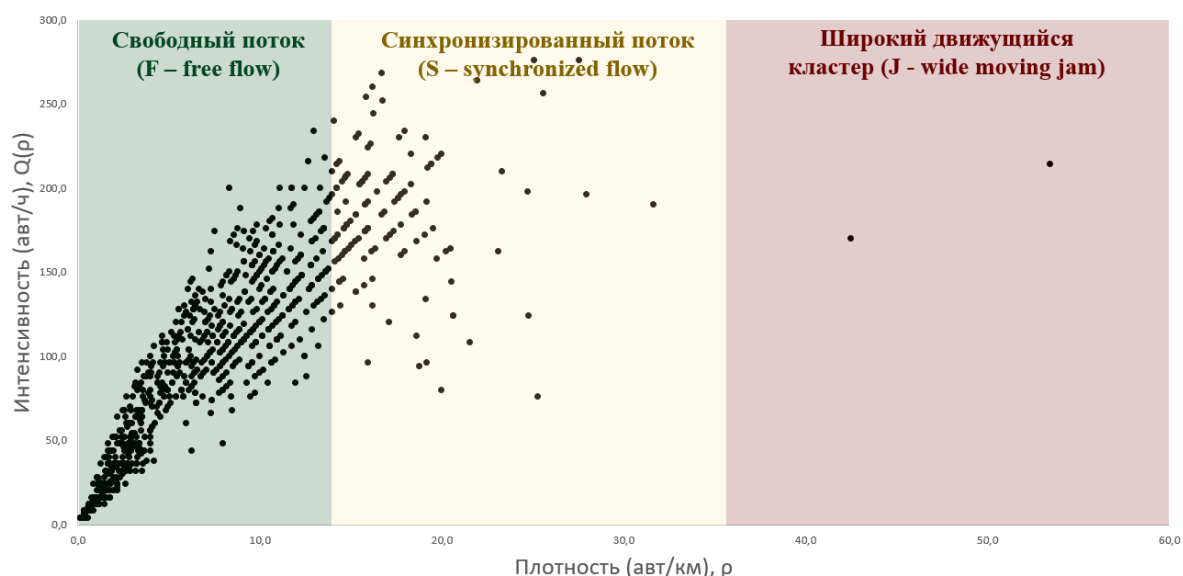


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма

Источник: составлено автором на основе анализа данных с детекторов транспорта г. Тулы.

Figure 2 – Phase diagram

Source: compiled by the author on the analysis of data from transport detectors in Tula.

### Фазовые переходы

Фазовые переходы в рассматриваемых транспортных теориях описывают изменения в состоянии потока.

В зависимости от теоретической модели, фазовые переходы могут быть представлены по-разному (таблица). В данной главе рассмотрены фазовые переходы в рамках двухфазных и трехфазной теорий, а также процессы, происходящие при этих переходах и обратных процессах.

#### Двухфазная теория

В двухфазной теории, базирующейся на фундаментальной диаграмме трафика, основными фазами являются свободный и плотный потоки.

В рамках LWR-модели предполагается существование фундаментальной зависимости между макроскопическими переменными: плотностью  $\rho$ , интенсивностью  $Q$  и скоростью движения  $v$ . Эта зависимость выражается через фундаментальную диаграмму транспортного потока, которая показывает взаимосвязь между этими переменными.

$$Q = \rho \cdot v.$$

Фазовый переход в двухфазной теории возникает из-за превышения критической плотности транспортных средств.

Фазовый переход в контексте дорожного потока – это процесс резкого изменения состояния системы, который происходит при достижении определенного критического значения плотности потока. В фундаментальной диаграмме фазовый переход отображается как нелинейное изменение характеристик потока, таких как скорость и интенсивность.

Согласно исследованию Хельбинга [17], фазовый переход начинается, когда плотность достигает значений, близких к критической плотности  $\rho_c$ , что соответствует половине максимальной плотности  $\rho_{max}$ .

При фазовом переходе происходит изменение ряда процессов, как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях. Во-первых, наблюдается резкое снижение средней скорости потока, сопровождаемое значительным увеличением дисперсии скоростей между отдельными транспортными средствами. В результате увеличения плотности системы транспортный поток испытывает сильные колебания, известные как осцилляции трафика (stop-and-go), что было подробно описано в исследованиях Лайтхилла и Уизема.

Обратный фазовый переход – это процесс восстановления нормального трафика из состояния плотного потока. Однако этот процесс не всегда симметричен фазовому переходу в затор:

Таблица  
Сравнение двухфазной и трехфазной транспортной теории  
Источник: составлено автором.

Table  
Comparison of two-phase and three-phase theories of traffic flows  
Source: compiled by the author.

Характеристика	Двухфазные теории	Трехфазная теория Б. Кернера
Число фаз	(Свободный поток, Плотный поток)	(Свободный поток, Синхронизированный поток, Широкий движущийся кластер)
Диаграмма отображения	Фундаментальная диаграмма	Фазовая диаграмма
Теоретическая основа	Гидродинамическая модель	Эмпирическая основа
Прогнозирование заторов	Модель недостаточно точна в сложных условиях, прогнозы ограничены рамками двух фаз	Более точное и детализированное моделирование с учетом сложных переходов и метастабильности
Переходы между фазами	Свободная и перегруженная фазы разделены критической точкой	Каскад $F \rightarrow S \rightarrow J$ фазовых переходов (двойная Z-характеристика)
Метастабильность	Свободный поток считается стабильным до определенного момента, после чего происходит резкий переход в фазу заторов	Метастабильные состояния F и S потоков
Метод отображения	Аппроксимированная кривая	Облако точек

- При снижении плотности трафика после затора автомобили могут двигаться быстрее, но их скорость восстанавливается не сразу. Автомобилисты могут действовать осторожнее, что приводит к тому, что скорость увеличивается постепенно.

- Волны stop-and-go могут сохраняться некоторое время даже после того, как нагрузка на дорогу снижается. Это явление известно как гистерезис.

### **Трехфазная теория**

Трехфазная теория описывает несколько фундаментальных свойств фазовых переходов:

- Переход от свободного к плотному потоку, известный как traffic breakdown, в рамках этой теории объясняется возникновением фазы синхронизированного потока, то есть переходом  $F \rightarrow S$ . Образовавшийся плотный поток соответствует определению [S] фазы синхронизированного потока.

- Переход от свободного к плотному потоку, наблюдаемый в эмпирических данных – переход первого рода  $F \rightarrow S$ .

- Синхронизированный поток может возникать как спонтанно (спонтанный переход  $F \rightarrow S$ ), так и индуцированным образом (индуцированный переход  $F \rightarrow S$ ). Спонтанный пере-

ход подразумевает, что в случае, когда вблизи узкого места уже существует свободный поток, фазовый переход происходит в результате внутренних возмущений транспортного потока. В отличие от этого, индуцированный переход  $F \rightarrow S$  инициируется возмущением потока, возникающим на некотором расстоянии от узкого места, и затем распространяется к нему.

- Широкие движущиеся кластеры не формируются в свободном потоке, однако могут возникать в области синхронизированного потока. Этот процесс называется  $S \rightarrow J$  фазовым переходом.

- В теории трех фаз линия J разделяет однородные состояния синхронизированного потока на две области: состояния выше линии J являются метастабильными относительно образования широких движущихся кластеров, тогда как состояния ниже этой линии стабильны.

В рамках трехфазной теории большое внимание уделяется обратным фазовым переходам. Обратный  $S \rightarrow F$  фазовый переход сопровождается гистерезисом. В области синхронизированного потока сильное избыточное ускорение ответственно за обратный переход от синхронизированного потока к свободному ( $S \rightarrow F$ -переход).

### Сравнение фундаментальной диаграммы и фазовой диаграммы

- **Фундаментальная диаграмма** в двухфазной теории представляет собой график, показывающий зависимость между плотностью и потоком транспортных средств. Она позволяет описывать поведение транспортного потока в условиях низкой и высокой плотности, но не учитывает более сложные переходы и взаимодействия.

- **Фазовая диаграмма** в трехфазной теории Кернера более сложная и детализированная. Она показывает, как изменения в плотности и скорости могут приводить к переходам между тремя состояниями: свободным потоком, синхронизированным потоком и широким движущимся кластером. Фазовая диаграмма позволяет моделировать сложные взаимодействия между фазами и предсказывать образование заторов с большей точностью.

### Критика двухфазной и трехфазной теорий

#### Критика двухфазной теории

В своих трудах Б. Кернер критикует классические теории, основанные на фундаментальной диаграмме, по причине их неспособности объяснить эмпирические данные о возникновении заторов на дорогах [18-20]. Эти теории основываются на предположении, что движение транспорта может быть описано двумя фазами: свободным потоком и заторами. Однако Кернер утверждает, что реальная картина более сложна и требует введения третьей фазы – синхронизированного потока.

#### Ограничения фундаментальной диаграммы

Классические модели опираются на фундаментальную диаграмму, которая связывает плотность транспортного потока с его скоростью и предполагает, что переход от свободного потока к заторам происходит одномоментно при достижении определенной плотности. Однако Кернер указывает на несколько проблем с этим подходом.

#### Игнорирование синхронизированного потока

Фундаментальная диаграмма не может объяснить существование синхронизированного потока, который характеризуется стабилизацией скоростей на более низком уровне, чем в свободном потоке, без полного перехода к заторам.

#### Нуклеационная природа заторов

В отличие от классических моделей, которые предполагают, что заторы возникают при достижении определенной плотности потока,

Б. Кернер вводит концепцию нуклеации – заторы могут возникать спонтанно даже при низких плотностях, если есть достаточное возмущение. Эта концепция нуклеации не учитывается в двухфазных теориях, что делает их менее пригодными для моделирования реального поведения транспорта.

#### Метастабильность свободного потока

Ключевым аспектом критики является метастабильность свободного потока. В двухфазной модели свободный поток считается стабильным до определенного момента, после чего происходит резкий переход в фазу заторов. Кернер же показывает, что свободный поток метастабильен – он может долго сохраняться при определённых условиях, но может внезапно перейти в синхронизированный поток при наличии локальных возмущений.

#### Некорректные выводы о пропускной способности

Б. Кернер утверждает, что фундаментальная диаграмма приводит к неверным выводам о пропускной способности дороги. В рамках двухфазной теории пропускная способность фиксирована, но Кернер показывает, что в реальности существует «стохастическая пропускная способность», которая варьируется в зависимости от условий и может быть разной даже при одинаковых плотностях потока. Это связано с вероятностной природой заторов, которую классические модели не учитывают.

#### Критика трехфазной теории

Несмотря на новаторство, трёхфазная теория подвергается критике со стороны различных исследователей и специалистов в области транспортного моделирования [20-23].

#### Сложность и переусложнение модели

Одно из главных критических замечаний по отношению к трёхфазной теории заключается в её сложности. В отличие от классических моделей, которые представляют движение в двух фазах, трёхфазная модель включает дополнительную фазу синхронизированного потока. Трайбер, Кестинг считают, что добавление этой фазы усложняет математическое описание транспортных потоков без значительного улучшения точности модели [24]. Трайбер, Кестинг критикуют трёхфазную теорию за переусложнение и утверждают, что более простые модели, такие как LWR (Лайтхилл, Уизем, Ричардс), которые основываются на фундаментальной диаграмме потока, предоставляют достаточно хорошие результаты в большинстве реальных приложений и гораздо проще в вычислениях и применении на практике.

### *Недостаточная эмпирическая проверка*

Ещё одним аспектом критики является недостаточная эмпирическая проверка трёхфазной теории [25]. Критики указывают на то, что в ряде случаев трёхфазная модель не была адекватно протестирована на широком спектре ситуаций, особенно в условиях городского трафика, где поведение транспортных потоков значительно отличается от поведения на автомагистралях.

Критики также подчёркивают, что многие выводы Кернера основаны на ограниченных наборах данных (Bundesautobahn 5), что делает его теорию недостаточно универсальной. Трёхфазная теория лучше описывает специфические условия, при которых часто наблюдаются резкие переходы между фазами, но она может быть менее применима в ситуациях, когда движение не подвержено таким резким изменениям.

### *Проблемы с интеграцией в существующие транспортные модели*

Трёхфазная теория Кернера предлагает новый взгляд на поведение транспортных потоков, однако её интеграция в существующие транспортные модели и системы управления движением вызывает трудности. Большинство моделей управления движением и планирования основаны на классических теориях, таких как теория Лайтхилла-Уизема-Ричардса и модели на основе фундаментальной диаграммы.

Для того чтобы интегрировать трёхфазную теорию в существующие системы, требуется значительное перерабатывание алгоритмов и подходов к управлению трафиком. Это влечёт за собой высокие затраты и значительное время на разработку и тестирование, что делает широкое применение этой теории на практике затруднительным.

### *Ограниченная применимость в моделировании городского движения*

Большая часть критики трёхфазной теории касается её ограниченной применимости в условиях городского трафика. Трёхфазная теория лучше всего работает на автомагистралях с высокими скоростями и большими потоками транспорта, где фазы движения чётко различимы. В условиях городского движения, поток формируется под влиянием множества факторов – работы светофорных циклов, пешеходных потоков, остановок общественного транспорта, пересечений и других элементов инфраструктуры, которые создают сложные, локальные, стохастические режимы движения. Эти режимы сложно однозначно отнести

к одной из фаз, предложенных в рамках трёхфазной теории.

### *Стохастическая природа фазовых переходов*

Одной из ключевых особенностей трёхфазной теории является стохастический характер фазовых переходов, особенно в случае перехода от свободного движения к синхронизированному потоку. Критики утверждают, что стохастическая природа таких переходов усложняет прогнозирование и контроль дорожных потоков. В отличие от более детерминированных моделей, где переходы можно предсказать на основе фиксированных порогов, в трёхфазной модели существует элемент случайности, что затрудняет её использование в системах управления движением в реальном времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе проведен сравнительный анализ двухфазных теорий и трехфазной теории Б. Кернера, что позволило выделить ключевые различия между этими подходами к описанию транспортных потоков. Двухфазные теории, несмотря на их историческую значимость и простоту применения, показывают ограниченные результаты при моделировании сложных динамических процессов, таких как метастабильность и внезапные переходы между состояниями потока. Трёхфазная теория, предложенная Кернером, видится более точной и эффективной в моделировании реальных дорожных условий, что подтверждается обширными эмпирическими данными.

Полученные результаты показывают, что трёхфазная теория обладает значительными преимуществами в прогнозировании заторов и управлении транспортными потоками. Она более адекватно описывает сложные переходные процессы и метастабильные состояния, что позволяет лучше прогнозировать и предотвращать заторы на дорогах. Сравнение с двухфазными теориями подчеркивает, что трёхфазная модель более применима к современным условиям, особенно в условиях интенсивного движения и непредсказуемых изменений в транспортных потоках.

Научная новизна исследования заключается в детальном анализе и сравнении двух подходов, что позволило выделить критические аспекты и потенциальные зоны изучения трёхфазной теории Б. Кернера. Теория заслуживает особого внимания в контексте изучения транспортных потоков и включает в себя важные аспекты, такие как диагностика состо-

яния транспортного потока, выявление предзаторовых состояний, управление выездом с перекрестков. Было показано, что трехфазная теория Б. Кернера обладает более широкими возможностями для описания метастабильных состояний и сложных переходов между фазами, что делает ее более предпочтительной для анализа транспортных потоков.

Сферы применения полученных результатов включают разработку более эффективных систем управления транспортными потоками, создание прогнозных моделей для предупреждения заторов, а также улучшение методов анализа дорожных ситуаций.

В настоящее время потенциал теории, особенно в части ее применения в условиях городских УДС, практически не используется. Прогноз относительно развития темы исследования предполагает дальнейшее изучение трехфазной теории с акцентом на критические аспекты, такие как возможные ограничения и недостатки модели Кернера. Выделение этих аспектов позволит улучшить существующие модели и создать более совершенные инструменты для анализа и управления транспортными потоками в будущем.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цзянг Х. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока / Х. Цзянг // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 2:С. 22-28. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28>. EDN HXVITR.
2. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-Dimensional Lwr Model for Disordered Traffic. SSRN Electronic Journal. 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252>
3. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-dimensional LWR model for lane-free traffic. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990>
4. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование движения автомобильного транспорта с использованием макро- и микроскопических моделей // Computational Mathematics and Information Technologies. 2023. Т. 7(2): 60-72. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72>. EDN ICANQB.
5. Урыков В.А., Зеленина Л.И. Математические модели транспортных потоков // Современная техника и технологии. 2015. № 6(46): 4-9. EDN UAЕYDD.
6. Кленов С.Л., Вегерле Д., Кернер Б.С., Шрекенберг М. Обнаружение медленно движущихся или неожиданно возникающих неподвижных «бутылочных горлышек» в транспортном потоке на основе теории трех фаз // Computer Research and Modeling. 2021. 13( 2): 319-363. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363>. EDN DBKICA.
7. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке - новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2010. Т. 2, № 4(8): 75-89. EDN OFYOHZ.
8. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review // Elektrotechnik und Informationstechnik. 2015. 132(7):417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>.
9. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, 2016.
10. Kerner Boris S.. Breakdown in vehicular traffic: driver over-acceleration, not over-reaction. 2023. Corpus ID: 261884503
11. Kerner Boris S. Physics of automated-driving vehicular traffic. Physical review. E 108 1-1 2023. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302>
12. Kerner Boris S., Klenov Sergey L., Wiering Vincent, Schreckenberg Michael. A methodology of cooperative driving based on microscopic traffic prediction. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780>
13. Kerner Boris S., Klenov Sergey L.. Microscopic features of the effect of vehicle overacceleration on traffic flow. Physical review. E 112 3-1. 2025. <https://doi.org/10.1103/8l5g-zjpn>
14. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В., Пышный В.А. Учет сложности в задачах транспортного спроса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 6:66-78. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66>. EDN LMFWWC.
15. Агуреев И.Е., Бордуков А.В. Трехфазная теория транспортных потоков Б. Кернера и ее применение в интеллектуальных транспортных системах // Транспорт. Взгляд в будущее - TFV-24: Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. С. 75-77. EDN MVMQVY.
16. Тишкин В.Ф., Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование транспортных потоков на основе квазигазодинамического подхода и теории клеточных автоматов с использованием суперкомпьютеров // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. 16(1): 175-194. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194>. EDN FBSUCA.
17. Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow // The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2009; vol. 70(2):229-241.
18. Kerner B.S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review. Physica A: Statistical

Mechanics and Its Applications. 2013; 392(21): 261–5282. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004>

19. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7): 417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>

20. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving. 2016.

21. Helbing D., Treiber M., Kesting A., Schönhof M., *Eur. Phys. J.* 2009. B. 69: 583–598.

22. Schönhof M., Helbing D., *Transp. Res.* 2009. B 43: 784–797.

23. Treiber M., Kesting A., Helbing D., *Transp. Res.* 2010. B 44: 983–1000.

24. Treiber Martin; Kesting Arne; Helbing Dirk. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts // *Transportation Research Part B*: 2010. Methodological. 44 (8–9).

25. Rehborn Hubert; Klenov Sergey L; Palmer Jochen. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany. *Physica A*: 2011. Statistical Mechanics and Its Applications. 390: (23–24).

## REFERENCES

1. Jiang H. Modelirovaniye peredvizheniya transportnykh sredstv na osnove makroskopicheskoy fundamental'noy diagrammy transportnogo potoka. KH. TSzyang. T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2022; T.16(2): 22–28. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28>. EDN HXVITR. (In Russ.)

2. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-Dimensional Lwr Model for Disordered Traffic. *SSRN Electronic Journal*. 2022; <https://doi.org/10.2139/ssrn.4111252>

3. Agrawal Shrey, Venkatesan Kanagaraj and Martin Treiber. Two-dimensional LWR model for lane-free traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128990>

4. Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G. Modelirovaniye dvizheniya avtomobil'nogo transporta s ispol'zovaniyem makro- i mikroskopicheskikh modeley. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023; 7(2): 60–72. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-60-72>. EDN ICANQB. (In Russ.)

5. Urykov V.A., Zelenina L.I. Matematicheskiye modeli transportnykh potokov. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015; 6(46):4–9. EDN UAEYDD. (In Russ.)

6. Klenov S.L., Wegerle D., Kerner B.S., Schreckenberg M. Prediction of moving and unexpected motionless bottlenecks based on three-phase traffic theory. *Computer Research and Modeling*. 2021; Vol. 13(2):319–363. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2021-13-2-319-363>. EDN DBKICA.

7. Klenov S.L. Teoriya Knera trekh faz v transportnom potoke - novyy teoreticheskiy bazis dlya intel-

lektual'nykh transportnykh tekhnologiy. *TRUDY MFTI. Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2010; T. 2.4(8):75–89. EDN OFYOHZ. (In Russ.)

8. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7):417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>

9. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, 2016.

10. Kerner Boris S. Breakdown in vehicular traffic: driver over-acceleration, not over-reaction. 2023; Corpus ID: 261884503

11. Kerner Boris S. Physics of automated-driving vehicular traffic. *Physical review. E* 108 1-1 2023; <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.014302>

12. Kerner Boris S., Klenov Sergey L., Wiering Vincent, Schreckenberg Michael. A methodology of cooperative driving based on microscopic traffic prediction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129780>

13. Kerner Boris S., Klenov Sergey L. Microscopic features of the effect of vehicle overacceleration on traffic flow. *Physical review. E* 112 3-1. 2025; <https://doi.org/10.1103/8l5g-zjpn>

14. Agureyev I. Ye., Akhromeshin A.V., Pyshnyy V.A. Uchet slozhnosti v zadachakh transportnogo sprosa. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*. 2023; 6: 66–78. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66>. EDN LMFWWC. (In Russ.)

15. Agureyev I. Ye., Bordukov A.V. Trekhfaznaya teoriya transportnykh potokov B. Knera i yeye primeneniye v intellektual'nykh transportnykh sistemakh. *Transport. Vzgl'yad v budushcheye - TFV-24 : Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 07–08 noyabrya 2024 goda. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet imperatritsy Yekateriny II*. 2024; S. 75–77. EDN MVMQVY. (In Russ.)

16. Tishkin V.F., Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G. Modelirovaniye transportnykh potokov na osnove kvazigazodinamicheskogo podkhoda i teorii kletochnykh avtomatov s ispol'zovaniyem superkomp'yuterv. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye*. 2024; 16(1):175–194. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-1-175-194>. EDN FBSUCA. (In Russ.)

17. Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow. *The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems*. 2009; 70(2): 229–241.

18. Kerner B.S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2013; 392(21): 5261–5282. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004>

19. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: A critical review. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2015; 132(7): 417–433. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0340-3>

20. Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: *Stochastic highway capacity and automatic driving*. 2016.
21. Helbing D., Treiber M., Kesting A., Schönhof M., *Eur. Phys. J.* 2009. B. 69: 583–598.
22. Schönhof M., Helbing D., *Transp. Res.* 2009. B 43: 784–797.
23. Treiber M., Kesting A., Helbing D., *Transp. Res.* 2010. B 44: 983–1000.
24. Treiber Martin; Kesting Arne; Helbing Dirk. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010; 44 (8–9).
25. Rehborn Hubert; Klenov Sergey L; Palmer Jochen. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2011; 390: (23–24).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бордуков Антон Викторович – аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы» Тульского государственного университета (300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92).

**ORCID:** <http://orcid.org/0009-0009-6579-436X>,

**e-mail:** [av.bordukov@gmail.com](mailto:av.bordukov@gmail.com)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bordukov Anton V. – Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Machines and Processes, Tula State University (92 Lenin Ave., Tula, 300012).

**ORCID:** <http://orcid.org/0009-0009-6579-436X>,

**e-mail:** [av.bordukov@gmail.com](mailto:av.bordukov@gmail.com)