

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03

О ПРИМЕНЕНИИ ПОНЯТИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**О. П. Бобровская^{1,2,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}, В. А. Галкин^{1,2,c}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, ✉ o-bobrovskaya@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Аннотация: для характеристики транспортного потока предлагается использовать понятие температуры из Больцмановской кинетической теории. Приведен вывод формулы условной температуры транспортного потока. Проведены эксперименты с различными стартовыми условиями моделирования: количеством агентов (транспортных средств) и их расположением. На графиках отражены характеристики транспортного потока: количество перестроений между полосами, зависимость интенсивности от плотности, средняя скорость, температура.

Ключевые слова: транспорт, температура транспортного потока, микроскопическая модель транспортного потока, температура газа.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0580-2021-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления».

Для цитирования: Бобровская О. П., Гавриленко Т. В., Галкин В. А. О применении понятия температуры для описания транспортного потока. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03.

Поступила в редакцию: 20.04.2024.

В окончательном варианте: 21.05.2024.

THE TRAFFIC FLOW TEMPERATURE CONCEPT**O. P. Bobrovskaya^{1,2,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2,b}, V. A. Galkin^{1,2,c}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, ✉ o-bobrovskaya@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Abstract: this paper proposes using the concept of temperature from Boltzmann’s kinetic theory to characterize transport flow. We derive a formula for the conditional temperature of the transport flow. Experiments are conducted with various initial conditions, including the number of agents (vehicles) and their locations. The results, presented in graphs, display key characteristics of the transport flow: the number of lane-to-lane conversions, the intensity-density relationship, the average speed, and the temperature.

Keywords: temperature, transport flow temperature, microscopic traffic flow model, gas temperature.

Acknowledgements: this study is the 47 GP government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0580-2021-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods.

Cite this article: Bobrovskaya O. P., Gavrilenko T. V., Galkin V. A. The Traffic Flow Temperature Concept. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03.

Original article submitted: 20.04.2024.

Revision submitted: 21.05.2024.

Введение

Транспортный поток, представляющий собой движение транспортных средств, является предметом активного исследования. Изучаются проблемы сбора характеристик реального транспортного потока [1], имитационного моделирования [2], управления потоком [3]. Целью исследований являются улучшение дорожной обстановки, выявление проблем транспортной сети и поиск их решений, автоматизация транспортных перевозок.

Изменения скоростей и полос/коридоров, происходящие при движении транспортных средств по треку, можно назвать хаотичными. В подтверждение этому в работе [4] отмечается, что транспортная система городского трафика в общем случае является хаотической системой. Кроме того, в теории транспорта имеется традиция выделения нескольких фаз транспортного потока, что является явной параллелью с моделями, рассматриваемыми в термодинамике. Выделялись 2 фазы: свободный поток и заторный (пробка), которые отражает фундаментальная диаграмма. Позже Б. Кернером была предложена трехфазная модель с дополнительной фазой синхронизированного потока [5].

В физическом смысле понятие температуры связано со средней кинетической энергией [6]. В физике хаотичность связана с температурой и внутренней энергией потока [7]. Возможность рассмотрения транспортного потока как аналога потока частиц жидкости или газа в физике уже находила отражение в некоторых исследованиях. В работе [8] предпринята попытка использовать термодинамические методы для анализа нефизических процессов на примере транспортного потока и проведены эксперименты с данными из Голландского тоннеля. Авторы [9] исследуют поток автоматизированных транспортных средств в открытой системе как аналог потока зернистой среды. Далее предлагается для характеристики состояния транспортного потока применить метод оценки температуры газа.

Температура как характеристика транспортного потока

Представим агентов (автомобили в транспортном потоке) в виде частиц, которые имеют одинаковые положительные массы. Тогда плотность распределения агентов в исследуемой области (рис. 1) будет определяться [10]:

$$\rho = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^n m_i, \quad (1)$$

где N — общее количество частиц в пространстве; n — количество частиц в исследуемой области (агенты, расположенные от -2 м до 2 м); S — площадь среза исследуемой области (количество коридоров); m — масса частицы в пространстве.

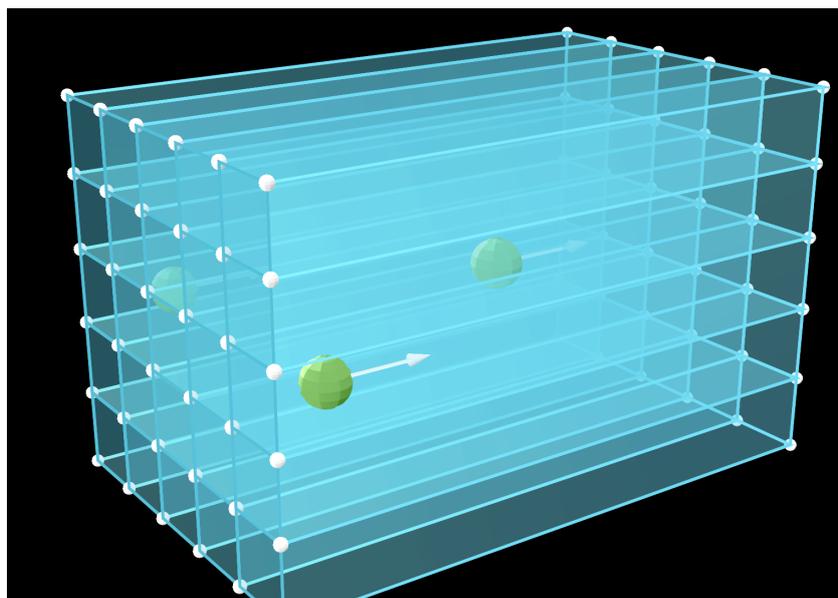


Рис. 1. Пример исследуемой области маршрута: 25 доступных коридоров, расположенных квадратом 5x5; с 3-мя агентами

Определив статистическую оценку среднекинетической энергии хаотического движения частицы с помощью (2), получаем формулу для определения давления (3):

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^1 \left(\sum_{i=1}^n (\bar{v}_i^{(j)})^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^{(j)} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где $v_i^{(j)}$ – (продольная проекция скорости) скорость движения i -го агента по траектории;

$$P = \frac{\delta^2}{3}. \quad (3)$$

Классическое соотношение Клапейрона–Менделеева для определения состояния идеального газа:

$$P = R\rho T, \quad (4)$$

где R – газовая постоянная; ρ – плотность; T – температура.

В результате получим условную температуру потока:

$$T = \frac{NS\delta^2}{3Rn}. \quad (5)$$

Можем увидеть и оценить динамику ее изменений: чем выше температура, тем сильнее хаотичность движения агентов в потоке [11].

Классификатор по температуре. Температура транспортного потока

Из приведенных выше уравнений можно сделать следующие выводы:

1. Если температура равна нулю, то поток «холодный». Это значит, что все агенты либо стоят на месте, либо двигаются равномерно.
2. Ненулевая температура свидетельствует о возмущениях в потоке. Единичные агенты или их множество двигаются в транспортном потоке с ускорением.

Значения температуры потока можно использовать в качестве триггерного элемента для мониторинга потока и управления. Резко возрастающее значение температуры или превышение заданного значения служит сигналом, чтобы обратить внимание на дорожную обстановку и принять необходимые меры. Таким возмущением может являться опасное вождение или превышение скорости со стороны одного из агентов.

При малом количестве отслеживаемых агентов изменение поведения одного из них сильнее влияет на изменения значения температуры. Изменение количества агентов в наблюдаемой области может вызвать колебания температуры, если эта область влияет на их поведение (перекресток, светофор, место, в котором образовалась пробка).

Численное моделирование

Модель транспортного потока, основанная на потенциале действия, описана в [12]. Она была разработана для обеспечения движения транспортных средств без столкновений. Транспортные средства представлены частицами, притягивающимися или отталкивающимися друг от друга в зависимости от расстояния между ними. Траектория для движения агентов была строго задана окружностью с несколькими коридорами, в которые возможны перестроения.

Ниже результаты моделирования для 1000 агентов, в начальный момент времени равномерно распределенных по одной полосе (снизу, слева квадрата) и имеющих начальную скорость 8 м/с. Радиус трека 36 м. Количество доступных коридоров 100, расположенных квадратом 10x10. Время моделирования 2 мин. Ограничение скорости 8 м/с. В начале моделирования агенты останавливались из-за малых дистанций согласно правилам алгоритма и перестраивались по возможности в соседние коридоры (на самом первом шаге в верхний и правый коридоры с одинаковой вероятностью). Результаты моделирования в виде графиков представлены на рис. 2.

Количество перестроений увеличивается за первую минуту до 20 ед./с в среднем и спадает на пару единиц к концу второй минуты. На фундаментальной диаграмме отражается свободный поток.

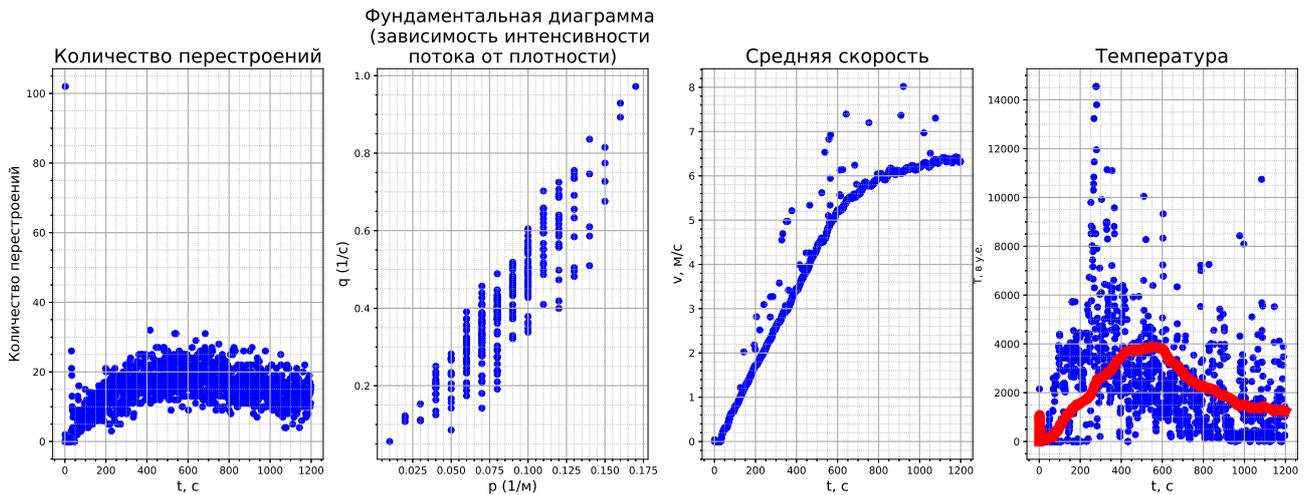


Рис. 2. 1000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

Средняя скорость поднимается до 6 м/с. Температура повышается за 1/6 времени моделирования до 4000, а затем плавно снижается до 1000; при этом наблюдаются выбросы. На графике представлена кривая скользящего среднего с окном 350, сглаживающая эти выбросы.

Следующий эксперимент проводился при тех же условиях, но начальное положение агентов изменено с одного коридора на равномерное распределение по всем 100 коридорам (рис. 3).

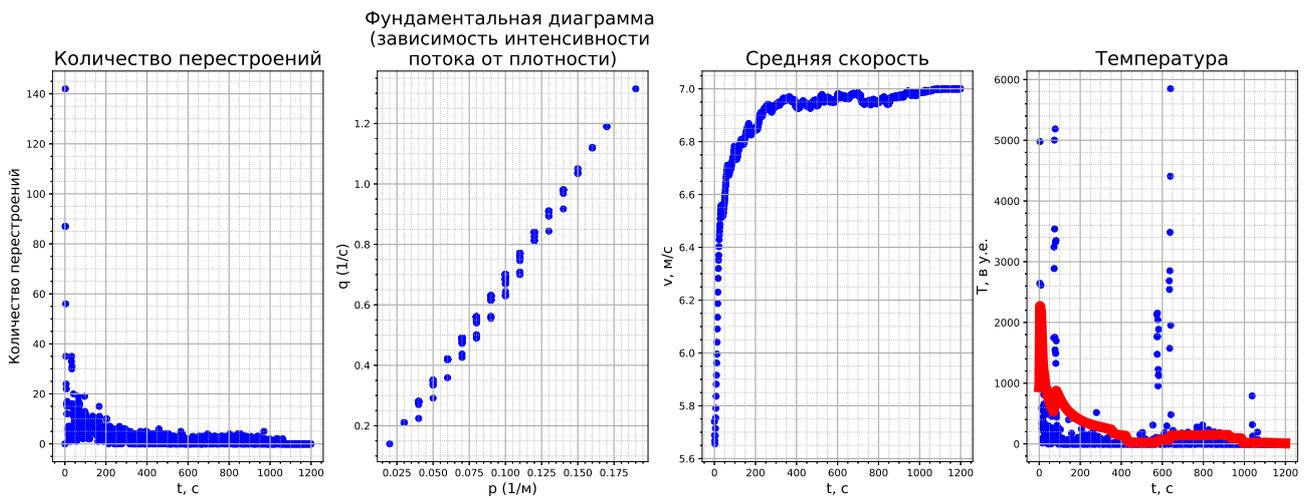


Рис. 3. 1000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

Так как агенты изначально были равномерно распределены по треку, количество перестроений быстро достигает стабильного значения около 15 ед. в с. На фундаментальной диаграмме отражается свободный поток. Средняя скорость сразу приближается к значению 7 м/с и больше не возрастает. Некоторые колебания и выбросы свидетельствуют о краткосрочных и малых по объему заторах. Низкое значение температуры (за исключением тех же выбросов) свидетельствует о движущихся равномерно и свободно (без взаимодействий) агентах.

При тех же начальных условиях количество агентов было увеличено в 2 раза. Результаты моделирования для начального положения на одной полосе и равномерного распределения по всем полосам представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Увеличение количества агентов привело к увеличению количества перестроений и большему разбросу значений на фундаментальной диаграмме. Уменьшилось значение максимально достигаемой средней скорости. Значения температуры стали больше и с большим разбросом. Отсутствие перегиба на графике средней скорости (рис. 4) свидетельствует о том, что максимально возможная средняя скорость потока не достигается за время моделирования, и может объясняться тем, что не все агенты начали движение.

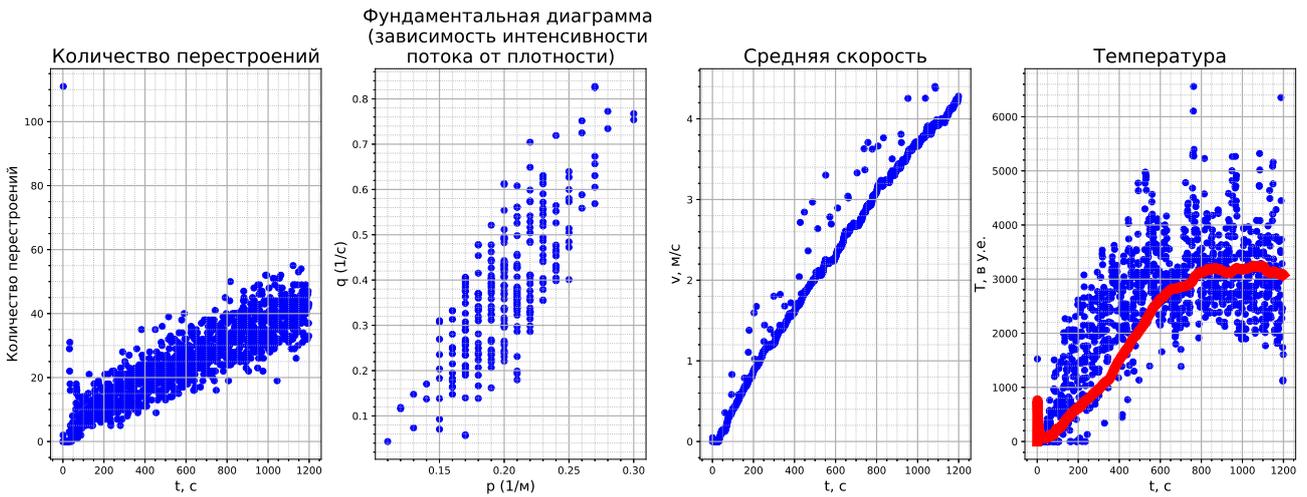


Рис. 4. 2000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

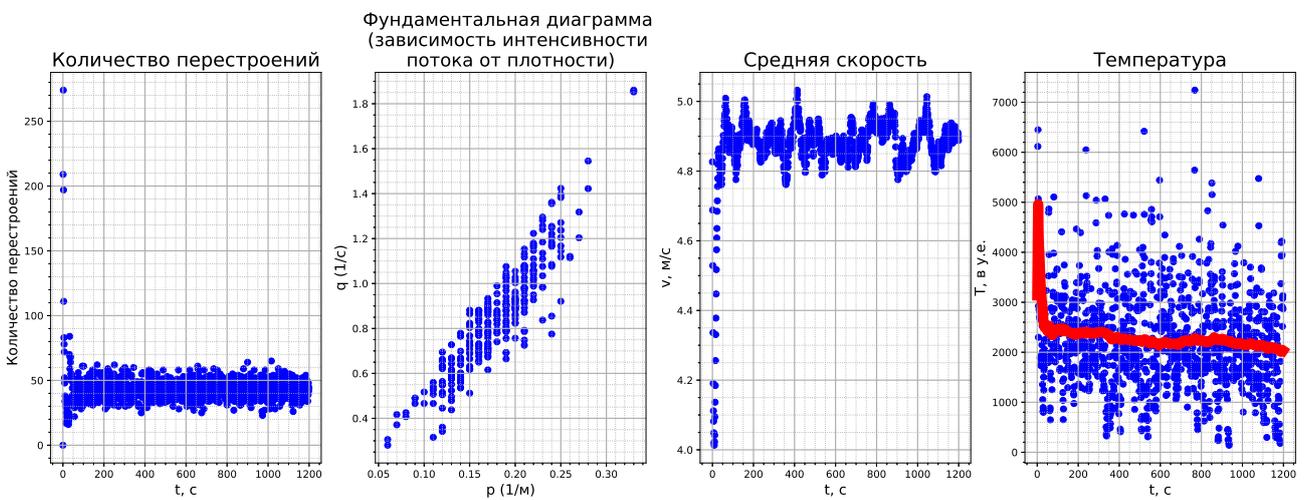


Рис. 5. 2000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

На рис. 6 и 7 представлены запуски 4000 агентов, изначально расположенных в одном коридоре и с равномерным начальным распределением по всем коридорам, соответственно.

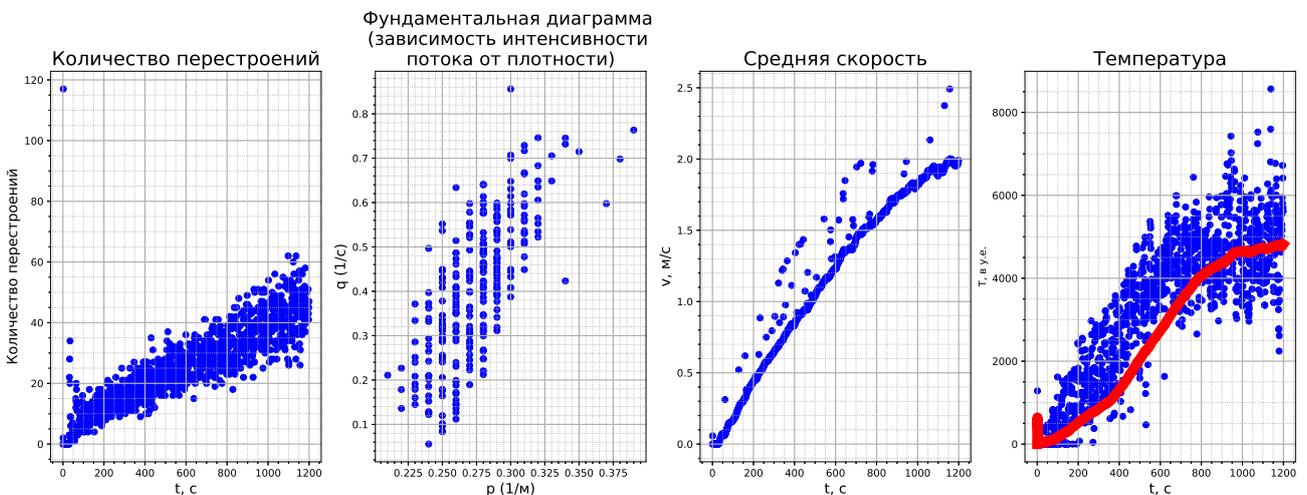


Рис. 6. 4000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

В первом случае агенты перестраиваются, чтобы занять все доступное пространство, в процес-

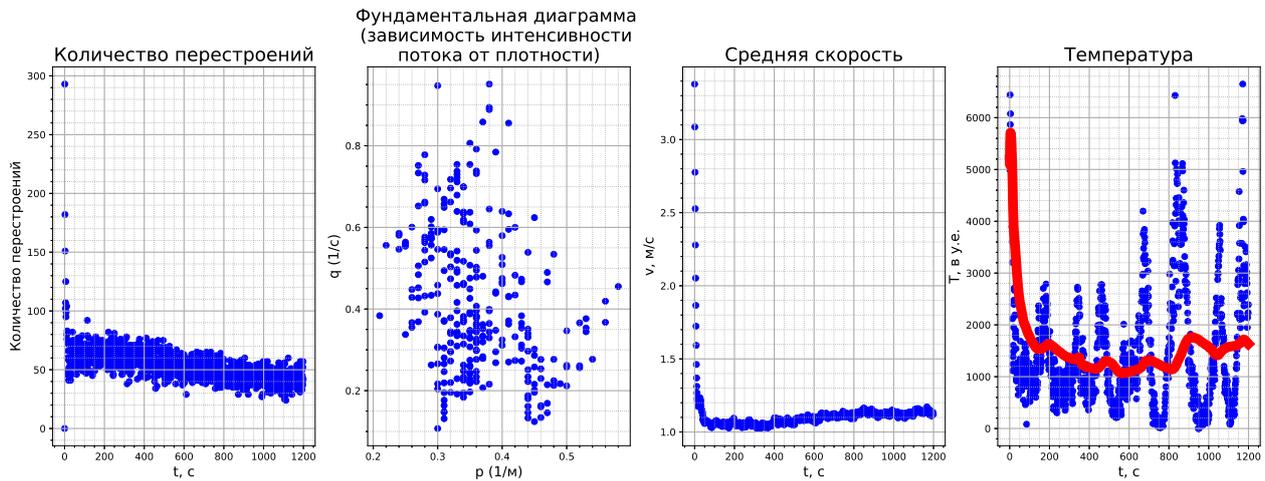


Рис. 7. 4000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

се появляется все больше агентов, движущихся с ненулевой скоростью, поэтому температура возрастает. Во втором случае свободного пространства, которое можно занять, нет, поэтому возможности для сильного разброса в скоростях у агентов тоже нет, соответственно, температура возрастает не столь сильно.

На рис. 7 значение средней скорости в отличие от рис. 5 не увеличивается, а уменьшается после запуска. Значение средней температуры стало меньше, при этом выделились заметные колебания. На фундаментальной диаграмме видно, что поток перестал быть свободным и приближается к заторному.

Количество агентов задано равным 5000, изначально все агенты находятся в одном коридоре (рис. 8).

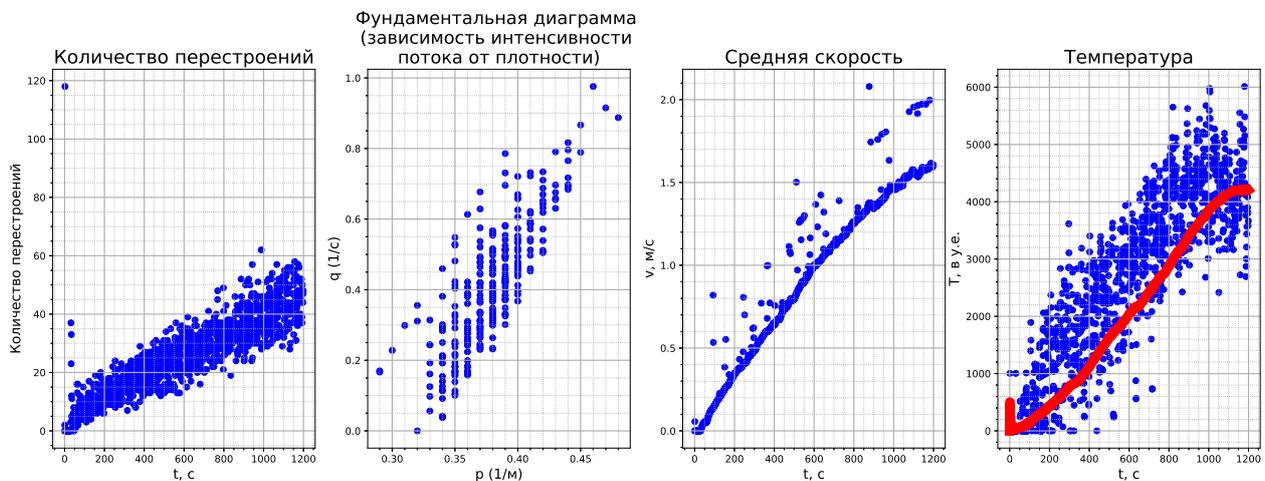


Рис. 8. 5000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

По сравнению с 4000 агентами на рис. 6 увеличилась плотность потока. При этом сохранилось значение максимальной интенсивности. Соответственно, уменьшились максимально достигаемые за время моделирования средняя скорость и температура.

Количество агентов задано равным 5000, начальное распределение равномерное по всем коридорам (рис. 9).

В начальный момент времени у агентов есть положительная начальная скорость и немного пространства впереди. Но затем большинство агентов большую часть времени моделирования стоят на месте, поэтому и средняя скорость, и температура находятся около нуля.

Количество агентов было увеличено в 2 раза до 10000 (10^4). В момент старта все агенты располагались в одном коридоре, при этом под конец 2-й мин многие там и остались. Результаты представлены на рис. 10.

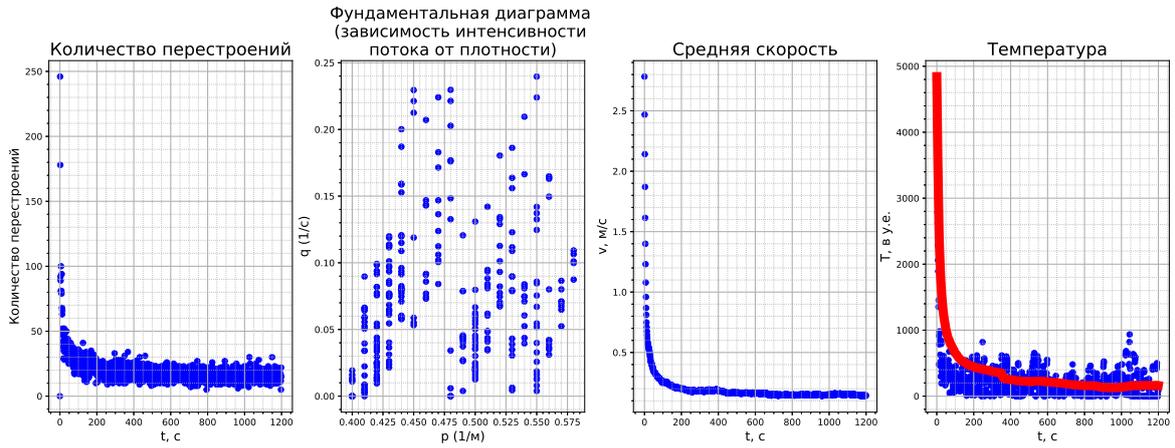


Рис. 9. 5000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

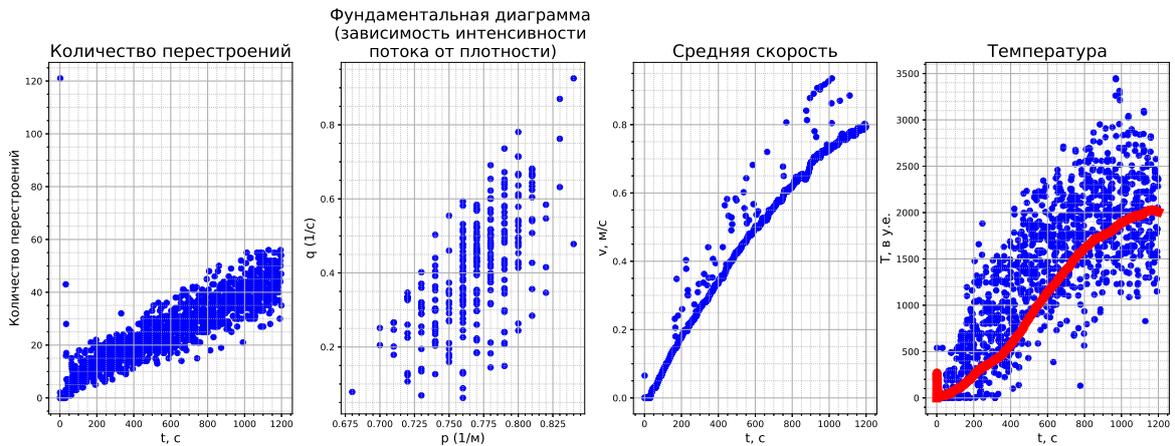


Рис. 10. 10 000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

Увеличение в 2 раза количества агентов не повлияло на количество перестроений. Значение максимальной средней скорости агентов уменьшилось в 2 раза по сравнению с рис. 8. В 2 раза уменьшилась температура потока.

Запуск 10000 агентов, равномерно распределенных по всем полосам, представлен на рис. 11.

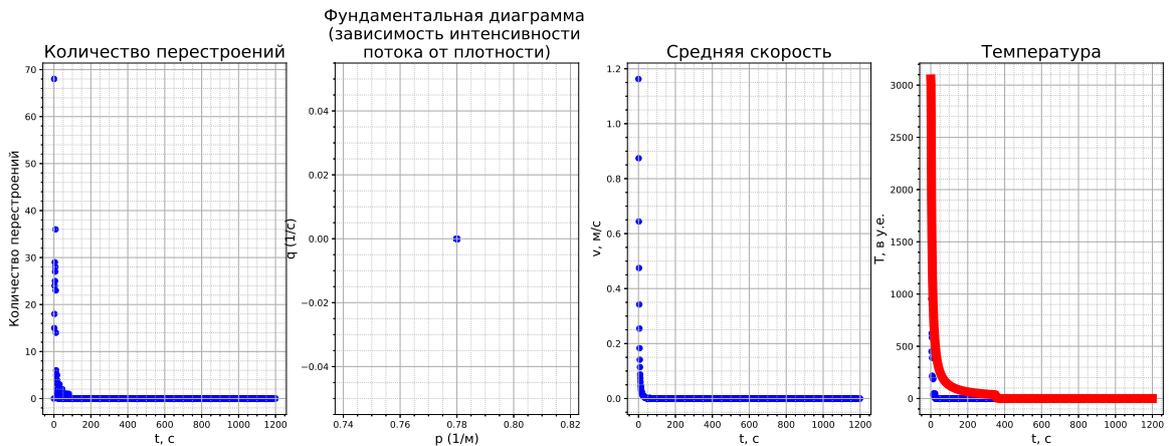


Рис. 11. 10 000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

Движение наблюдается на протяжении около 100 с, поскольку в начальный момент времени агенты имеют скорость 8 м/с. Замедление из-за большой плотности приводит к тому, что все агенты останавливаются.

Обсуждение

В таблице ниже приведены обобщенные данные со стартовыми условиями экспериментов, установившимися характеристиками потока и температурой для 3-х равных промежутков времени 2-минутного интервала моделирования.

Таблица

Сводка результатов

Кол-во агент.	Кол-во старт. полос	Макс. плотн., 1/м	Макс. интенс., 1/с	1/3 Ср. темп., К	2/3 Ср. темп., К	3/3 Ср. темп., К
1000	1	0.17	1.0	4000	2000	1500
1000	100	0.18	1.3	200	200	0
2000	1	0.30	0.8	1500	3000	3000
2000	100	0.30	1.6	2300	2200	2000
4000	1	0.35	0.8	1500	4000	4800
4000	100	0.50	0.9	1200	1200	1500
5000	1	0.45	0.9	1000	3000	4200
5000	100	0.58	0.2	400	200	200
10000	1	0.83	0.8	500	1600	2000
10000	100	0.78	0.0	0	0	0

Два нулевых значения температуры соответствуют свободному потоку, когда 1000 агентов равномерно распределены на 100 полосах и движутся со скоростью 7 м/с, и полномасштабной пробке, когда 10000 агентов стоят на месте.

Можно отметить возрастание температуры с течением времени для всех случаев старта агентов с одной полосы. При этом старт со всех полос, в основном, приводил к уменьшению температуры в процессе моделирования.

Заключение

Была рассмотрена условная температура транспортного потока в качестве полезной характеристики для понимания происходящих в транспортном потоке взаимодействий транспортных средств.

Приведены графики, характеризующие состояние транспортного потока для заданной модели движения агентов без столкновений при различных начальных условиях моделирования. Изменения, происходящие в процессе моделирования, отслеживались по временным графикам количества перестроений и средней скорости, фундаментальной диаграмме. График температуры потока содержал информацию, отсутствующую на предыдущих графиках.

Это может быть полезно при мониторинге дорожной сети и управлении ею.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосева М. С. О методах сбора и анализа основных характеристик транспортного потока. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022;16(2):29–38.
2. Бабичева Т. С. Транспортные потоки: математическое и имитационное моделирование. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2015;2(11):290–296.
3. Дивеев А. И., Софронова Е. А., Михалев В. А. Нейроадаптивное управление транспортными потоками в сети городских дорог. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2018;1:49–58. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-49-58.
4. Колесниченко А. В. Самоорганизация стохастической транспортной системы под влиянием индуцированных мультипликативным шумом фазовых переходов. *Матем. моделирование*. 2015;27:11:120–134.
5. Jin C. J., Wang W., Jiang R., Wang H. An Empirical Study of Phase Transitions from Synchronized Flow to Jams on a Single-Lane Highway. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2014;47(12):125104. DOI: 10.1088/1751-8113/47/12/125104.

6. Черчиньяни К. *Математические методы в кинетической теории газов* / пер. с англ. В. С. Галкина [и др.] ; под ред. М. Н. Когана. М.: Мир; 1973. 245 с.
7. Галкин В. А. *Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2011. 408 с.
8. Reiss H., Hammerich A. D., Montroll E. W. Thermodynamic Treatment of Nonphysical Systems: Formalism and an Example (Single-Lane Traffic). *Journal of Statistical Physics*. 1986;42(3–4):647–687. DOI: 10.1007/BF01127733.
9. Larraga M. E., del Rio J. A., Mehta A. Two Effective Temperatures in Traffic Flow Models: Analogies with Granular Flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002;307(3):527–547. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00583-0.
10. Быковских Д. А., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Моделирование движения невзаимодействующих частиц в пространстве. *Северный регион: наука, образование, культура*. 2015;2(32):48–55.
11. Еловой С. Г., Гавриленко А. В. Информационная система анализа состояния сердечно-сосудистой системы на основе гидродинамических показателей. *Вестник кибернетики*. 2016;1(21):114–119.
12. Бобровская О. П., Гавриленко Т. В., Галкин В. А. Модель транспортного потока, основанная на взаимодействии частиц с потенциалом действия. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2022;40(3):72–87.