

CONSTRUCTION AND RESEARCH OF MICROSCOPIC MODELS FOR TRAFFIC FLOW

G. Y. Kazancev, *G. A. Omarova

Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Russia

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
630090, Novosibirsk, Russia

Simulation of transport systems is the demanded task in control of road networks helping to make decisions on further development and extension of transport system. In particular, simulation allows defining need for extension of a road network or adding of means of regulation. In this paper, traffic is simulated according to two different models: the cellular automaton based on cellular automaton of the Nagel-Scheckenberg model and Intelligence Driver model and existed cellular automata model was modified for simulations of multilane roads and multilane intersections.

The Intelligence Driver model was proposed by Treiber. It is continuous deterministic one-dimensional model, which defines acceleration of vehicle i as function from its own velocity $v_i(t)$, gap $s_i(t)$ and velocity difference $\Delta v_i(t)$ to the vehicle in front $i - 1$. For experiments, integration with simple Euler scheme was used, with time discretization of $\Delta t = 0.4$ s and translation of vehicles in each step according to equation of motion with constant acceleration for period of time Δt .

The Nagel-Scheckenberg model is a one-dimensional stochastic machine designed to simulate traffic. The model dimensional grid used in each cell is placed exactly one machine, the cell is either empty or contains a car. Time is discrete, the machine moves to forward an integral number of cells for each step of iteration. At each step of the iteration for each car in turn all the rules are applied. The first rule is responsible for aspiration of drivers to go as soon as possible, without violating the rule, the second rule doesn't allow collisions, and the third rule introduces an element of randomness in the motion of each driver. This rule set is the minimum set necessary for reproduction of basic properties of a transport flow. The main advantage of this model is its simplicity compared with other approaches; it is important in the transition to more complex structures, such as multi-row model or models including intersections or implementation of modification, which allow more accurate imitation of driver's behavior, such as slow-to-start and slow-to-stop models. In slow-to-start model for third rule used velocity-dependent random value with higher chance of slow if velocity on previous step is zero. In slow-to-stop model in addition was modified second rule, so vehicle begins to slow not in the last moment before collision but in several steps before according to velocity difference and expectations about gap between vehicles according to their velocities on previous step.

Experiments with both models with equivalent parameters and same initial conditions results in obtaining similar fundamental diagrams of traffic flow for one line traffic. In both cases traffic flow increasing with increase of its density at first, but after near same density value it begins decreasing to near zero in situations where density is equal to one. Max value of traffic flow is also similar in both cases.

To allow cellular automata, based on Nagel-Scheckenberg model, to simulate multilane road, rule for changing lines is needed. In this paper symmetrical change-line rule was used, there are no differences in changing line to left or to right. With this rule if vehicle found way forward blocked but still can move in this step according to its velocity and line near current have greater gap, vehicle change lines.

Simulation of multiline intersection is more complex, because according to traffic regulations on intersections with more than one line not all directions of turn available for vehicles on different lines. So although the only difference on intersection is different trajectories for vehicles on different lines, on road before intersection vehicles should change lines to come on intersection on right position according to traffic regulations. According to that, in close vicinity of intersection, priority of choosing line changes from line where vehicle can move faster to line, where vehicle can move to correct road to its course according to traffic regulations.

A cellular automaton for traffic simulation of multiline intersections was designed. The program of generation of the cellular automaton for different intersections was realized.

The models can be used to understand, predict and optimize different traffic situations and as examples for the various possible extensions and fields of applications.

Key words: model, cellular automaton, Tribler model, slow-start and slow-stop models, distance, speed, acceleration.

References

1. HERMANN G., KULKOV I. N., KERNER B. S., SCHRECKENBERG M. Microscopic Simulation of Synchronized Flow in City Traffic: Effect of Driver's Speed Adaptation // SIMUL 2014: The Sixth International Conference on Advances in System Simulation.
2. ZEHE D., GROTZKY D., AYDT H. Traffic Simulation Performance Optimization through Multi-Resolution Modeling of Road Segments // SIGSIM-PADS'15, June 10–12, 2015, London, United Kingdom. ACM 978-1-4503-3557-7/15/06. <http://dx.doi.org/10.1145/2769458.2769475>.
3. DOLGUSHIN D. YU., MYZNIKOVA T. A. Primenenie kletochnyh avtomatov k modelirovaniyu avtotransportnyh potokov. Omsk: SibADI, 2012.
4. ZHANG L., MA Y., LI S. A hybrid traffic flow model for real time freeway traffic simulation // KSCE Journal of Civil Engineering. 2014. V. 18, N 4. P. 1160–1164.
5. TIMOFEEVA G. A., AHMADINUROV M. M. Gibrinaya matematicheskaya model' transportnogo potoka // Fundamental'nye issledovaniya. 2011. N 12–2. S. 389–392.
6. BELBASI S., FOULAADVAND E. M. Simulation of Traffic Flow at a Signalised Intersection // Cellular Automata. ACRI, 2010. P. 138–141.
7. KAZANCEV G. YU., OMAROVA G. A. Modelirovanie transportnyh potokov s primeneniem kletochnyh avtomatov // Problemy informatiki. 2016. N 3.
8. DZH. FON NEJMAN. Teoriya samovosproizvodyashchih avtomatov. M.: „Mir“, 1971.
9. NAGEL K., SCHRECKENBERG M. A cellular automation model for freeway traffic // Phys. I France. 1992. V. 2. P. 2221–2229.
10. HELD T., BITTICH S. Cellular automata for traffic simulation — Nagel-Schreckenberg model. // Project report in Computational Physics, Bonn 17'th March 2011.
11. ZAMITH M., LEAL-TOLEDO R. C. P., KISCHINHEVSKY M., CLUA E., BRANDAO D., MONTENEGRO A., LIMA E. B. A Probabilistic Cellular Automata Model for Highway Traffic Simulation // International Conference on Computational Science, ICCS 2010.
12. KNOSPE W., SANTEN L., SCHADSCHNEIDER A., SCHRECKENBERG M. A realistic two-lane traffic model for highway traffic // J. Phys. A: Math. Gen. 35. 2002.
13. TREIBER M., HELBING D. Explanation of observed features of self-organization in traffic flow // e-print arXiv:cond-mat/9901239, 1999.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МИКРОМОДЕЛЕЙ

Г. Ю. Казанцев, *Г. А. Омарова

Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 519.179.2+512.23

Данная работа является продолжением цикла работ авторов. В предложенном исследовании рассматриваются транспортные модели клеточных автоматов (СА) и модель Трайбера. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования с более ранними работами и между собой. Приведены фундаментальные диаграммы моделирования рассматриваемых моделей. Продолжены исследования, где каждый объект характеризуется индивидуальной скоростью, в отличие от ранних работ, где скорости были равны.

Ключевые слова: модель, клеточный автомат, модель Трайбера, slow-start и slow-stop модели, расстояние, скорость, ускорение.

Введение. В настоящее время применение различных микромоделей актуально при моделировании и исследовании различных дорожных ситуаций, при построении гибридных моделей или при переходе к мезомоделированию. Детальное представление выгодно во многих случаях, особенно при оценке взаимодействия между реальным поведением и последствиями на моделях при моделировании транспортного потока с несколькими (сотня) тысячами объектов, где требуется довольно большая обработка данных [1, 2]. Высокоэффективное вычисление и жизнеспособный вариант данного моделирования трудоемки, и доступ к таким системам есть не у всех. Поэтому хочется, чтобы в области дорожной сети, где более низкий уровень детализации достаточен, можно было бы сократить вычислительные ресурсы [3, 4]. В таких случаях микромодель может предложить средство улучшить обработку заданного участка, незначительно влияя на точность полного моделирования. Такие области могут быть магистралью между различными участками, перекрестками или соединением проселочных дорог города или деревни.

Необходимость решения предложенной задачи на индивидуальных вариантах состоит в отличии дорог, рельефа местности, правил дорожного движения в России [3, 5] и в описании поведения водителя в различных дорожных ситуациях [1, 6].

Данная работа является продолжением работы авторов [7]. В предлагаемом исследовании рассматриваются клеточно-автоматная модель, модель Трайбера и их сравнение. Продолжены исследования предыдущих работ, отличающихся тем, что каждый объект характеризуется еще и скоростью, в отличие ранних работ, где скорости были равны.

Дальнейшее изложение организовано следующим образом. В первом параграфе рассматриваются модель клеточного автомата и ее реализация для различных участков дороги, во втором рассматривается модель Трайбера или модель разумного водителя для прямого участка.

1. Клеточный автомат. Концепция клеточных автоматов была предложена Джоном фон Нейманом в начале 50-х годов. Клеточный автомат (СА) — это упорядоченная четверка $\langle C, A, \tau, X \rangle$, где C — множество клеток, A — конечный алфавит состояний клетки, τ — функция перехода из одного состояния в другое, часто представляемая набором правил, X — отношение соседства или шаблон соседства. Клеточный автомат фон Неймана — это двумерная сетка произвольного размера. Состояние сетки обновляется с течением времени, состояние каждой конкретной ячейки зависит от состояния ее соседей и, возможно, собственного состояния на текущей итерации. Количество возможных состояний конечно, обновление состояний происходит одновременно [7, 8].

Моделирование движения на прямой с одной полосой. Одной из самых популярных моделей для движения по прямой без обгонов и перестроений на основе клеточных автоматов является модель Нагеля-Шрекенберга и ее модификации, такие как slow-start и slow-stop модели [9, 10, 11].

Модель Нагеля-Шрекенберга представляет собой стохастический одномерный автомат, предназначенный для моделирования дорожного движения [4]. Данная модель имитирует движение по одной полосе прямой дороги без возможности обгона и перестроения. В модели Нагеля-Шрекенберга используется одномерная сетка, в каждую ячейку помещается ровно одна машина, ячейка либо является пустой, либо содержит автомобиль. Время дискретно, за каждый шаг итерации машина перемещается на целое число ячеек вперед. Для описания правил введем $n_i(t)$ и $v_i(t)$ — номер ячейки, в которой находится машина с номером i , и ее скорость (количество ячеек, которые будут пройдены) на шаге итерации t , $d_i(t) = n_{i+1}(t) - n_i(t)$ — дистанция между i -ой машиной и впереди идущей, машина с большим номером едет перед машиной с меньшим номером, v_{max} — максимальная допустимая скорость на участке.

Модель slow-start отличается от модели Нагеля-Шрекенберга наличием зависимости параметра p от скорости автомобиля [10]. Достигается это добавлением правила

$$p_i(t) = \begin{cases} p_0, & \text{if } v_i(t-1) = 0 \\ p_1, & \text{else} \end{cases}$$

к имеющимся правилам модели Нагеля-Шрекенберга. Данная модификация призвана отразить тот факт, что полностью остановившемуся автомобилю требуется больше времени для разгона, чем уже движущемуся. Дальнейшей модификацией является slow-finish модель, в которой правила были изменены, для того чтобы учитывать тот факт, что обычно водители предпочитают тормозить заранее, а не в последние секунды до столкновения [11].

Данная модель получается при замене правила торможения в slow-start модели на следующие два правила при $v_{max} = 5$:

1. *Торможение 1.* Если $d_i(t-1) \leq v_i(t-1)$

$$v_i(t) = \begin{cases} d_i(t-1) - 1, & \text{if } v_i(t-1) \leq v_{i+1}(t-1) \text{ or } v_i(t-1) \leq 2 \\ \min\{d_i(t-1) - 1, v_i(t-1) - 2\}, & \text{else.} \end{cases}$$

2. *Торможение 2.* Если $v_i(t-1) \leq d_i(t-1) \leq 2v_i(t-1)$

$$v_i(t) = \begin{cases} v_i(t-1) - 2, & \text{if } v_i(t-1) \geq v_{i+1}(t-1) + 4 \\ v_i(t-1) - 1, & \text{if } v_{i+1}(t-1) + 2 \leq v_i(t-1) \leq v_{i+1}(t-1) + 3. \end{cases}$$

Первое из правил торможения используется при малой дистанции между автомобилями, если впереди идущий автомобиль быстрее либо скорость невелика, то автомобиль тормозит не больше чем необходимо, иначе он может затормозить сильнее. Второе правило используется, когда дистанция заметно больше, и благодаря этому автомобиль, движущийся заметно быстрее впереди идущего, начинает тормозить заранее, причем величина ускорения зависит от разницы скоростей.

Реализация. Используем СА как структуру $CA = \langle A, C, \tau, X, T \rangle$, где $A = \{0, 1\}$ — множество состояний клетки, C — множество клеток, τ — функция перехода, меняющая состояние автомата, X — отношение соседства, T — множество тактов времени. Для определения состояния автомата в такт времени t применим τ к предыдущему такту $t-1$. M — множество объектов, движущихся в системе, и $m(c, t)$ — функция от клетки автомата и такта времени [7]. В отличие от предыдущей работы, каждый объект характеризуется тремя параметрами — направлением движения, скоростью и идентификатором.

Скорость объекта выражается целым числом, определяющим количество тактов модели до применения шага ускорения. Если скорость объекта ниже максимальной, то объект будет стоять на месте в течение количества тактов, равного разности между максимальной скоростью и текущей, даже если дорога перед объектом свободна. На шаге ускорения, если объект не достиг максимальной скорости и не был вынужден замедлиться из-за впереди идущего объекта, его скорость увеличивается. Если объект не смог двигаться из-за впереди идущего объекта, то его скорость уменьшается до реального количества тактов движения объекта. В завершение шага ускорения, если скорость больше нуля, то с вероятностью p она уменьшается на единицу. Для получения фундаментальной диаграммы потока удобно использовать циклические краевые условия, согласно которым объект может покинуть последнюю клетку, только если первая клетка свободна, что позволяет получить данные о потоке при фиксированной плотности потока. Для моделирования был взят участок длиной 200 клеток (1500 метров), между шагами ускорения проходит 1 секунда, максимальная скорость — 5 (37,5 м/с). Моделируется промежуток времени длиной 3000 секунд, начальные положение и скорость объектов для каждой плотности — случайны, значение потока берется среднее по 3 запускам с различным начальным расположением. В результате была получена следующая фундаментальная диаграмма потока (рис. 1). На полученной диаграмме видно, что поток сначала довольно быстро растет с увеличением роста плотности, и после достижения определенного уровня падает, стремясь к нулю при максимальной плотности потока. Такая картина схожа с эмпирическими данными, а также данными, полученными при моделировании с использованием других моделей [10, 11].

Моделирование движения на прямой с двумя полосами. При моделировании многополосного движения с использованием клеточных автоматов добавляются правила, определяющие желание водителя перестроиться с одной полосы на другую, и его возможность сделать это согласно правилам дорожного движения. Одним из наиболее простых вариантов правил для смены полосы являются симметричные правила, в которых перестроения в полосу левее и правее текущей считаются абсолютно одинаковыми и применяются до правил торможения [12]. Правила перестроения имеют следующий вид:

1. *Потребность в перестроении.*

Если $d_i(t-1) \leq v_i(t)$, то $need_i = 1$, иначе $need_i = 0$.

2. *Безопасность перестроения.*

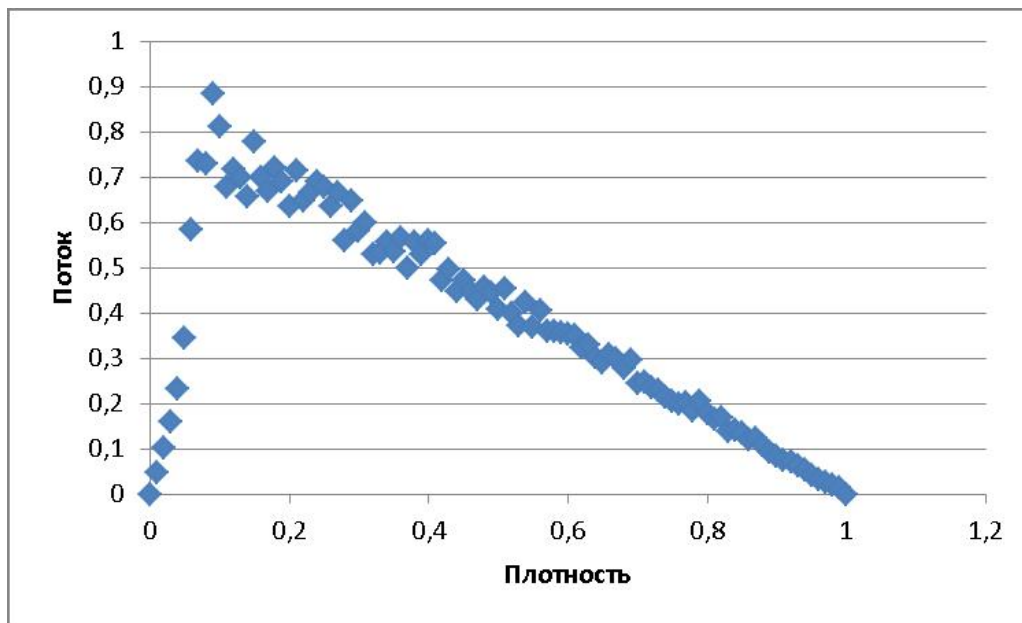


Рис. 1. Фундаментальная диаграмма потока на одной полосе

Если $d_{pred}(t-1) + v_{pred}(t-1) - 1 \geq v_i(t)$ и $d_{succ}(t-1) \leq v_{succ}(t-1)$, то $safe_i = 1$, иначе $safe_i = 0$.

3. Перестроение.

Если $need_i = 1$ и $safe_i = 1$, то сменить полосу.

$d_{pred}(t)$ и $v_{pred}(t)$ — это соответственно дистанция до впереди идущего автомобиля на соседней полосе и его скорость, $d_{succ}(t)$ и $v_{succ}(t)$ — дистанция и скорость до предыдущего.

На основе вышеописанной модели была сделана модификация движения по прямой для многополосного движения. Для этого были сделаны следующие изменения. В отношении соседства каждой клетки были добавлены клетки с теми же номерами на соседних полосах, аналогичная нумерация рассматриваемой полосы. Форма правил перестроения не отличается от основных правил, но важными клетками для них является не только клетка с номером $n_i + 1$, на которую переместится объект, но и клетка с номером n_i в соседней полосе. Правила перестроения применяются, если клетка не пуста и попытка применить основное правило была неудачна. Для построения фундаментальной диаграммы использовались те же условия, что и для однополосного случая, количество полос — две. В полученной диаграмме показано среднее значение потока на двух полосах по отношению к средней плотности на двух полосах. Характер диаграммы изменился: в многополосном случае вместо пика и последующего спада имеется промежуток плотностей, при которых поток примерно одинаков, и после этого промежутка начинается падение. На рис. 2 приведена фундаментальная диаграмма для двух полос.

Моделирование движения на перекрестке. При моделировании перекрестка сложность модели сильно возрастает, так как необходимо учитывать разное направление движения на перекрестке и возникающие из этого конфликты, а также средства регулирования. При моделировании перекрестков часто используют клетки, размер которых меньше длины l (фиксированная длина клетки), для более точного отражения ситуации на самом перекрестке. В некоторых работах рассматривают урезанные перекрестки, состоящие только

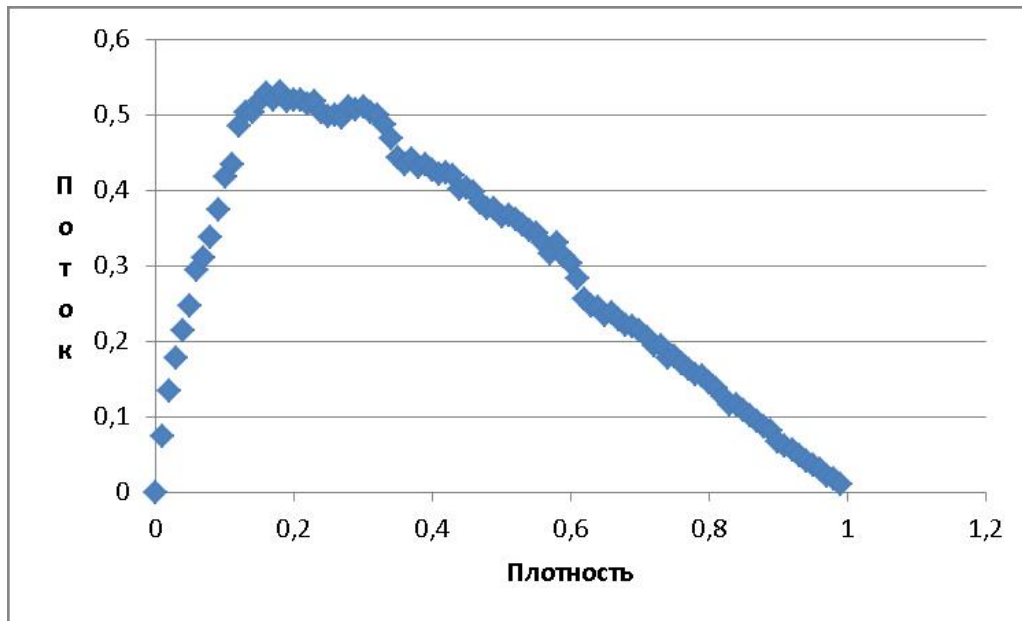


Рис. 2. Фундаментальная диаграмма потока на двух полосах

из двух пересекающихся полос, так как моделирование показало, что диаграммы потока у таких моделей мало отличаются от эмпирических данных [6]. В упрощенных моделях перекрестка в отсутствие средств регулирования при одновременной попытке двух автомобилей с разных дорог занять одну клетку конфликт решается либо с помощью случайного выбора приоритета, либо при назначении приоритета, зависящего от шага модели.

Для моделирования средств регулирования обычно добавляют по одной клетке для каждой дороги и связывают правила клеток, расположенных у входа на перекресток, с состоянием этих дополнительных клеток.

Для моделирования самого перекрестка используются клетки длины $\frac{l}{2}$. Так как на перекрестке возможно движение не только по прямой, но и повороты, в каждой клетке имеются правила для движения в нескольких направлениях, а выбор нужного правила происходит на основе направления, указанного в описании объекта. Правило „помеха справа“ реализовано через задание дополнительных важных клеток, приоритет дорог на перекрестке реализуется порядком выполнения правила, при котором сначала выполняются правила клеток, ведущих с перекрестков, затем правила клеток центра перекрестка, после этого правила клеток главных дорог, ведущих на перекресток, и наконец, правила второстепенных дорог, ведущих на перекресток. В случае, когда хотя бы одна из дорог имеет более одной полосы для движения в одну сторону, правила на самом перекрестке не сильно меняются. Главным изменением является то, что объекты, собирающиеся поворачивать направо и налево, еще на прямой стремятся перестроиться на соответствующую полосу. Вход на перекресток для движения направо и налево возможен только с соответственно крайней правой и крайней левой полос, движение вперед — согласно правилам конкретного перекрестка. Перестроения на перекрестке отсутствуют, при повороте налево на дорогу с более чем одной полосой выбирается полоса согласно дальнейшему маршруту или та, на которой больше дистанция до впереди идущего объекта.

2. Модель разумного водителя. Модель разумного водителя (Intelegent Driver Model (IDM)), являющаяся развитием модели следования за лидером и модели оптимальной скорости, была предложена М. Трайбером в 1999 году [13]. В этой модели ускорение автомобиля в каждый момент времени определяется как функция от расстояния до впереди идущего автомобиля, разности скоростей с ним и скорости текущего автомобиля.

$$s_n''(t) = F(s_{n+1}(t) - s_n(t), s_{n+1}'(t) - s_n'(t), s_n'(t))$$

Как показали численные эксперименты, модель М. Трайбера (1999) устойчива к вариации параметров, а также модель демонстрирует реалистическое поведение при разгоне и торможении и воспроизводит основные наблюдаемые свойства однополосного транспортного потока:

$$s_n''(t) = a_n \left[1 - \left(\frac{s_n'(t)}{V_n^0} \right)^\delta - \left(\frac{d_n^* (s_n'(t), s_{n+1}'(t) - s_n'(t))}{s_{n+1}(t) - s_n(t) - L} \right)^2 \right].$$

Первое слагаемое $a_n \left[1 - \left(\frac{s_n'(t)}{V_n^0} \right)^\delta \right]$ этого соотношения описывает динамику ускорения АТС на свободной дороге, в то время как второе слагаемое описывает торможение из-за взаимодействия с лидером. Параметр δ отвечает за поведение при разгоне. Второе слагаемое определяется отношением желаемой дистанции d_n^* (безопасным расстоянием) к фактической дистанции $s_{n+1}(t) - s_n(t) - L$, причем желаемая дистанция определяется следующим образом:

$$d_n^*(s_n'(t), s_{n+1}'(t) - s_n'(t)) = s_0 + \max \left\{ T_n s_n'(t) - \frac{s_n'(t)(s_{n+1}'(t) - s_n'(t))}{2\sqrt{a_n b_n}}, 0 \right\},$$

где s_0 — минимальное расстояние между стоящими машинами, b_n — ускорение „комфортного“ торможения, T_n — аналог времени реакции водителя. Как следствие, водитель стремится поддерживать большую дистанцию при высокой скорости движения. Третье слагаемое в описании дистанции отвечает за выравнивание скорости относительно впереди идущего транспортного средства, так как оно снижает величину тормозящего члена в ускорении, когда впереди идущий автомобиль движется быстрее, и увеличивает в обратном случае. Так как этот член описывает одновременно два разных процесса, для его нормировки используются величины комфортных ускорения и торможения.

Данная модель Трайбера предназначена для моделирования прямой однополосной дороги. В ходе моделирования использовались следующие параметры: длина машины — 5 метров, безопасная дистанция s_0 — 2,5 метра, длина дороги — 3000 метров, максимальная скорость $V_0 = 37,25$ м/с (130 км/ч). „Комфортные“ ускорения разгона и торможения $a_n = b_n = 2$ м/с², время реакции $T_n = 1,5$ с, $\delta = 1$. Для сохранения неизменной средней плотности потока дорога считается закольцованной, и для последней машины впереди идущей считается первая. Перед моделированием машины со случайной начальной скоростью получают координаты, кратные 7,5 м. Данный способ размещения машин был применен, чтобы избежать слишком большого количества коллизий на этом этапе. Для интегрирования используется метод Эйлера с промежутком дискретизации $\Delta t = 0,4$ с. Машины перемещаются по правилу

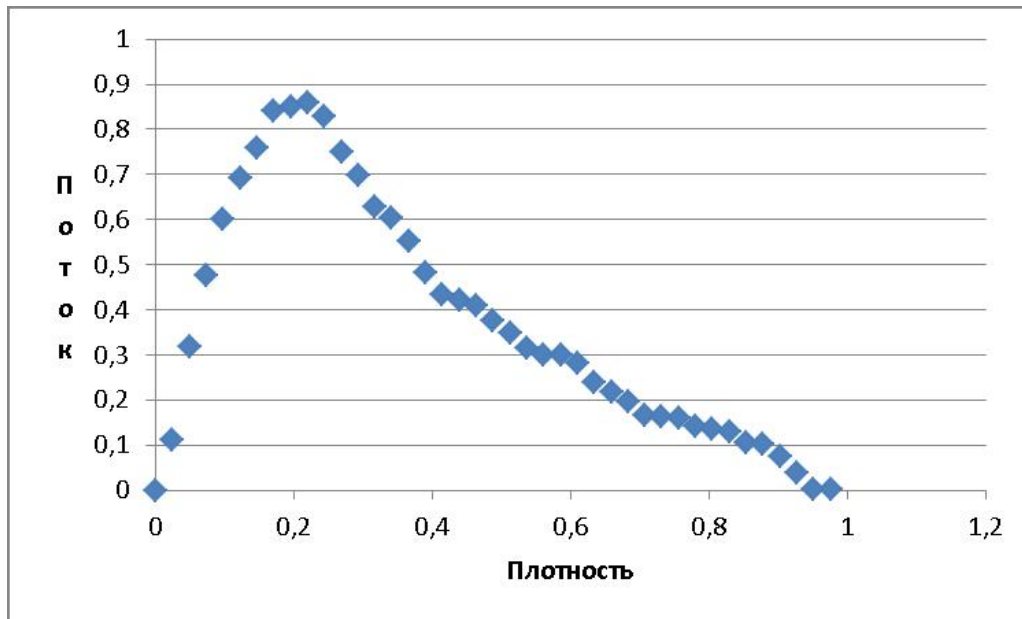


Рис. 3. Фундаментальная диаграмма потока модели Трайбера

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{a_i(t) \cdot \Delta t^2}{2}.$$

Положение i -й машины в следующий момент времени $(t + \Delta t)$ рассчитывается в предположении, что в течение Δt секунд машина движется с неизменным ускорением. $x_i(t)$, $v_i(t)$ и $a_i(t)$ — это соответственно положение, скорость и ускорение i -той машины в момент времени t .

Для построения фундаментальной диаграммы потока проводились 5 запусков модели с периодом моделирования 120 минут. На рис. 3 приведена фундаментальная диаграмма потока при моделировании с помощью модели Трайбера.

Заключение. В ходе работы был расширен клеточный автомат, описанный в ранних работах, в модель было добавлено понятие скорости автомобиля, реализовано перестроение на прямых многополосных дорогах и перекрестках многополосных дорог. Реализована модель Трайбера для однополосного движения, были проведены сравнения результатов моделирования с более ранними работами и между собой.

Построенные фундаментальные диаграммы незначительно отличаются от эмпирических данных, равно как и от результатов моделирования такой же однополосной дороги с помощью клеточных автоматов и модели Трайбера. В дальнейшем планируется разработка гибридной модели на основе системы массового обслуживания, поведение обслуживающих устройств которой описываются на основе результатов моделирования отдельных частей дорожной сети с использованием клеточных автоматов.

Список литературы

1. HERMANN G., KULKOV I. N., KERNER B. S., SCHRECKENBERG M. Microscopic Simulation of Synchronized Flow in City Traffic: Effect of Driver's Speed Adaptation // SIMUL 2014: The Sixth International Conference on Advances in System Simulation.

2. ZENE D., GROTZKY D., АУДТ Н. Traffic Simulation Performance Optimization through Multi-Resolution Modeling of Road Segments // SIGSIM-PADS'15, June 10–12, 2015, London, United Kingdom. ACM 978-1-4503-3557-7/15/06. <http://dx.doi.org/10.1145/2769458.2769475>.
3. ДОЛГУШИН Д. Ю., МЫЗНИКОВА Т. А. Применение клеточных автоматов к моделированию автотранспортных потоков. Омск, СибАДИ 2012.
4. ZHANG L., MA Y., L. S. A hybrid traffic flow model for real time freeway traffic simulation // KSCE Journal of Civil Engineering. 2014. V. 18, N 4. P. 1160–1164.
5. ТИМОФЕЕВА Г. А., АХМАДИНУРОВ М. М. Гибридная математическая модель транспортного потока // *Фундаментальные исследования*. 2011. N 12–2. С. 389–392.
6. BELBASI S., FOULAADVAND E. M. Simulation of Traffic Flow at a Signalised Intersection // Cellular Automata. ACRI, 2010. P. 138–141.
7. КАЗАНЦЕВ Г. Ю., ОМАРОВА Г. А. Моделирование транспортных потоков с применением клеточных автоматов // *Проблемы информатики*. 2016. № 3.
8. ДЖ. ФОН НЕЙМАН. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: „Мир“, 1971.
9. NAGEL K., SCHRECKENBERG M. A cellular automation model for freeway traffic // *Phys. I France*. 1992. V. 2. P. 2221–2229.
10. HELD T., WITTHN S. Cellular automata for traffic simulation — Nagel-Schreckenberg model. // Project report in Computational Physics, Bonn 17th March 2011.
11. ZAMITH M., LEAL-TOLEDO R. C. P., KISCHINEVSKY M., CLUA E., BRANDAO D., MONTENEGRO A., LIMA E. B. A Probabilistic Cellular Automata Model for Highway Traffic Simulation // International Conference on Computational Science, ICCS 2010.
12. KNOSPE W., SANTEN L., SCHADSCHNEIDER A., SCHRECKENBERG M. A realistic two-lane traffic model for highway traffic // *J. Phys. A: Math. Gen.* 35. 2002.
13. TREIBER M., HELBING D. Explanation of observed features of self-organization in traffic flow // e-printarXiv:cond-mat/9901239, 1999.



Казанцев Григорий Юрьевич — студент НГУ; e-mail: kazancev.grigorij@gmail.com.

Казанцев Григорий получил диплом бакалавра на механико-математическом факультете Новосибирского государственного университета в 2016 году. В настоящее время учится в магистратуре механико-математического факультета Новосибирского государственного университета. Его текущим исследовательским интересом являются клеточные автоматы и их применение для моделирования транспортных потоков.

Kazancev Grigory received his bachelor degree in Mathematics from Novosibirsk State University (2016). Now he is learning for magister degree in Novosibirsk State University. His current research interests include cellular automata and their implementation for modeling traffic.



Омарова Гульзира Алимовна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: gulzira@rav.sscs.ru.

Гульзира Омарова окончила механико-математический факультет Новосибирского государственного университета в 1995 году. В 1997 г. окончила магистратуру механико-математического факультета Новосибирского государственного университета. В 2007 году защитила кандидатскую диссертацию по специальности 05.13.18 в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. С 2000 года по настоящее время работает в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Г. Омарова занимается математическим и имитационным моделированием в области сетей и графов. Ей опубликовано более 30 работ в таких областях как построение и исследование алгоритми-

ческих моделей на сетях и графах, математическое и имитационное моделирование в исследовании различных транспортных ситуаций. В данное время основным проектом Г. Омаровой является микро- и макро моделирование транспортных потоков.

Gulzira Omarova graduated from mekhaniko-mathematical faculty of Novosibirsk State University in 1995, received her M.S. degree in Mathematics from the State University of Novosibirsk (1997), Ph.D. degree in Computer Science (2007) from the Institute of Computational Mathematics and Mathematical

Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS). Since 2000 till present works at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS. G. Omarova is engaged in mathematical and simulation modeling in the field of networks and graphs. She published over 30 papers in such areas as construction and research of algorithmic models on networks and graphs, mathematical and simulation modeling in research of different transport situations. Now is engaged mathematical models of transport flows.

Дата поступления — 29.06.2017