

А. С. Акопов^{1,2}, д-р техн. наук, проф. кафедры бизнес-аналитики¹, гл. науч. сотр.², e-mail: aakopov@hse.ru,

Л. А. Бекларян², д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: beklar@cemi.rssi.ru,

Н. К. Хачатрян^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики¹, ст. науч. сотр.²,
e-mail: nerses@cemi.rssi.ru; nkhattryan@hse.ru,

А. Л. Бекларян¹, канд. техн. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики, e-mail: abeklaryan@hse.ru,

Е. В. Кузнецова¹, канд. экон. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики, e-mail: ev.kuznetsova@hse.ru,

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Центральный экономико-математический Институт РАН

Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами*

Представлена система управления наземными беспилотными транспортными средствами (БТС), разработанная с использованием методов агентного имитационного моделирования (поддерживаемых в AnyLogic). Важной особенностью подобной системы является возможность оценки влияния различных параметров (таких как средние начальные скорости, интенсивности входных потоков, частота обмена данными между агентами-БТС и др.) на поведение и состояние беспилотных и обычных транспортных средств в плотном потоке. Исследованы эффекты "турбулентности" и "дорожных заторов", обусловленные преимущественно высокой плотностью транспортных средств, возникновением дорожно-транспортных происшествий и др.

Выполнена программная реализация разработанной имитационной модели в среде AnyLogic и проведены численные эксперименты. Найден режимы, обеспечивающие безопасное и скоростное движение транспортных средств в плотном потоке.

Ключевые слова: многоагентная система, беспилотные транспортные системы, интеллектуальная транспортная система, AnyLogic

Введение

В настоящее время актуализируется задача разработки новых интеллектуальных систем управления ансамблем наземных беспилотных транспортных средств (БТС) в целях обеспечения скоростного и безопасного трафика, максимизации пропускной способности транспортной системы и минимизации числа факторов (например, возникающих дорожно-транспортных происшествий (ДТП)), несущих угрозы другим участникам дорожного движения.

В качестве примеров инцидентов с наземными БТС можно упомянуть аварию с беспилотным автомобилем компании Google в 2016 г., когда, перестраиваясь в левый ряд, беспилот-

ник не уступил дорогу автобусу, смертельные ДТП с участием беспилотных автомобилей Tesla в 2016 и 2018 гг., вызванные принципиальными ошибками при оценке дорожной ситуации¹, другие аварии, связанные с использованием систем автопилотирования, в том числе случившиеся на территории РФ² и др. Относительно небольшое число подобных аварий объясняется в основном незначительным числом БТС, эксплуатируемых в настоящее время. Однако по оценкам различных экспертов³ уже к 2028 г. доля роботизированных транспортных средств в общем объеме мировых продаж составит не менее 13 %. В связи с вышеизложенным актуа-

¹<https://www.kommersant.ru/doc/3792047>.

²<https://tass.ru/proisshestiya/6752573>.

³<https://bespilot.com/sprojects/139->.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06003.

лизируется задача проектирования интеллектуальных систем управления ансамблем БТС, нацеленных на обеспечение минимизации рисков для участников дорожного движения в интенсивном транспортном потоке. Подобные системы могут, в частности, осуществлять адаптивное управление множественными характеристиками БТС в зависимости от складывающейся транспортной ситуации (например, варьировать скоростной режим, выбирать преобладающее направление движения с учетом "дорожных заторов" и ДТП и др.). Сложность проектирования таких систем обусловлена, во-первых, высокой размерностью соответствующих компьютерных моделей, а во-вторых, необходимостью принятия решений на индивидуальном уровне каждого объекта, движущегося в потоке с учетом их коммуникационных возможностей и характеристик внешней среды (например, геометрии проезжей части). Поэтому необходимо применять методы агентного имитационного моделирования и, в частности, феноменологический подход, учитывающий как психологические особенности поведения обычных водителей, так и специфическую реакцию роботизированной системы управления БТС на внешние события. При этом поведение ансамбля подобных транспортных средств можно сравнить с поведением людской толпы в условиях отсутствия (равномерный трафик) и наличия чрезвычайных ситуаций (возникновение множественных ДТП) с учетом существенно более сложных (регламентируемых) правил принятия решений на индивидуальном уровне каждого агента и возможностей использования современных коммуникационных возможностей (в частности, технологий передачи данных 5G).

К наиболее важным исследованиям в данной области следует отнести работы Дирка Хелбинга, который в своей статье, опубликованной в журнале Nature [1], систематизировал ряд явлений, характерных для толпы, таких как образование пробок, вовлечение новых людей в панику и других, основанных исключительно на описании поведения и взаимодействия агентов, а также идентифицировал потенциалы сил, соответствующие данным явлениям, в рамках ньютоновской механики (молекулярный подход). В предложенных Д. Хелбингом моделях [3, 4] развиваются методы молекулярной динамики, при этом психологическим и социальным факторам придаются смыслы потенциалов взаимодействия между молекулами-людьми. В дальнейшем методы, предложенные Д. Хелбингом, применялись,

в частности, для идентификации состояния автомобильного трафика на основе неполной информации [5], для развития трехфазной теории возникновения и диссипации пробок на автострадах, разработанной ранее Б. Кернером [6, 7], для построения высокопродуктивных самоорганизующихся сетей междугородной телекоммуникации [8] и др. Среди результатов российских ученых в области проектирования интеллектуальных транспортных систем следует выделить работы [9, 10].

Тем не менее, несмотря на существенные достижения в области моделирования транспортных потоков по-прежнему актуально применение агент-ориентированного, в частности феноменологического, подхода для исследования поведения ансамбля взаимодействующих транспортных средств с использованием существенно более простого аналогового описания состояний агентов и их взаимодействий. Подобный феноменологический подход был предложен в работах А. С. Аكوпова, Л. А. Бекларяна [11, 12] для исследования поведения толпы в условиях наличия или отсутствия чрезвычайных ситуаций. Важным преимуществом такого подхода является описание правил взаимодействия различных агентов друг с другом и внешней средой в рамках итоговой системы принятия решений отдельными агентами без необходимости проведения сложной вычислительной процедуры идентификации потенциалов различных сил системы в целом. В частности, такие правила могут быть описаны с помощью систем дифференциальных уравнений с переменной структурой, учитывающей все многообразие возможных взаимодействий и коллизий (потенциальных столкновений) между различными (движущимися или стационарными) объектами. Важнейшей характеристикой подобного подхода является определение понятия личного пространства агента, лежащего в основе возникновения и развития эффектов "турбулентности" и "давки" в условиях высокой и сверхвысокой плотности людских или транспортных потоков.

Принципиальным развитием феноменологического подхода является расширение индивидуальной системы принятия решений каждого агента за счет анализа влияний множественных дополнительных факторов, например, плотности агентов в выбранном секторе обзора, расстояния между агентами, изменения агентом направления собственного движения и др. Такое уточнение является в определенной степени развитием системы принятия решений,

представленной ранее в работе Г. Антонини [13], базирующейся на анализе ситуации в рамках сектора обзора агента с углом развертки, составляющим примерно 170°. В результате каждый агент осуществляет выбор той альтернативы, при которой достигается минимальное значение целевого функционала, учитывающего влияние множественных факторов (прежде всего плотности окружающих агентов, удаленности от внешних стен и барьеров и др.). В дальнейшем подобный подход получил свое развитие в работах А. Л. Бекларяна, А. С. Акопова, относящихся к разработке методов нечеткой кластеризации толпы в условиях чрезвычайных ситуаций [14].

К сожалению, вычисление и минимизация подобного целевого функционала на уровне каждого агента представляет собой сложную задачу, требующую значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для исследования поведения сложных (крупномасштабных) интеллектуальных транспортных систем наиболее рациональным представляется комбинирование расширенного феноменологического подхода с индивидуальной системой принятия решений, основанной на адаптивном управлении дирекционными углами, скоростными и прочими характеристиками, в том числе на основе информации, поступающей от других агентов.

В данной статье представлена разработка многоагентной интеллектуальной системы управления ансамблем наземных БТС, взаимодействующих с другими участниками дорожного движения, для обеспечения безопасного и скоростного трафика за счет выбора наилучших режимов функционирования и взаимодействия наземных БТС с учетом реальной (в частности, комбинированной) конфигурации проезжей части.

1. Модель поведения обычных и беспилотных транспортных средств

Разработанная модель движения наземных обычных транспортных средств (ОТС) и БТС, основана на использовании методов агентного имитационного моделирования для реализации правил поведения и взаимодействия соответствующих агентов на индивидуальном уровне.

В модели рассматривается эволюционная динамика двух популяций агентов:

- ОТС, управляемые людьми;
- наземные БТС с полностью роботизированным управлением.

Принципиальным отличием наземных БТС от ОТС является поддержка периодического (при условии отсутствия технических сбоев) информационного обмена между всеми движущимися БТС в целях обеспечения передачи сведений о наличии любых экстремальных ситуаций, в частности, в случае возникновения ДТП с участием БТС или ОТС. Подобные сведения используются для обеспечения адаптивного управления важнейшими характеристиками БТС, в частности, средней скоростью и направлением движения. Также могут передаваться сведения о наличии дорожных заторов (пробок), мелких и крупных аварий, неработающих светофорах и др.

Важной особенностью предложенной модели является использование понятия радиуса личного пространства агента (впервые предложенного в работах [9, 10] и лежащего в основе эффектов "турбулентности" и "давки"), являющегося функцией плотности потока транспортных средств, определяемой как общее число транспортных средств, окружающих (т.е. находящихся в непосредственной близости) данного агента.

Для упрощения анализа входные и выходные потоки ОТС и БТС в модели разделены и смешиваются (взаимодействуют) только в рамках кругового движения.

Пусть

T — набор временных моментов (в минутах); $|T|$ — общее число временных моментов; $t_0 \in T, t_{|T|} \in T$ — начальные и конечные моменты времени; $t_k \in T, k = 0, \dots, |T|$ — все индексы моментов времени;

$I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ — набор индексов обычных (не являющихся беспилотными) агентов, где $|I|$ — общее число ОТС;

$\tilde{I} = \{1, 2, \dots, |\tilde{I}|\}$ — набор индексов наземных БТС, где $|\tilde{I}|$ — общее число наземных БТС.

Тогда плотность потока транспортных средств относительно некоторого j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) определяется равенством

$$\rho_j(t_k) = \chi_I(j) \sum_{i \in I \cup \tilde{I}} m_{ji}(t_k) + \chi_{\tilde{I}}(j) \sum_{i \in I \cup \tilde{I}} \tilde{m}_{ji}(t_k), \quad (1)$$

где

$$m_{ji}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } d_{ji}(t_k) \leq r; \\ 0, & \text{если } d_{ji}(t_k) > r; \end{cases} \quad (2)$$

$$\tilde{m}_{ji}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{d}_{ji}(t_k) \leq r; \\ 0, & \text{если } \tilde{d}_{ji}(t_k) > r, \end{cases}$$

Здесь $\{d_{ji}(t_k), \tilde{d}_{ji}(t_k)\}$ — оцениваемое расстояние до i -го агента ($i \in I \cup \tilde{I}$) от данного j -го агента для $j \in I$ и $j \in \tilde{I}$ соответственно, в момент времени t_k ($t_k \in T$) (заметим, что \tilde{d}_{ji} совпадает с евклидовым расстоянием), а r — радиус обзора для оценки плотности размещения транспортных средств, являющийся параметром системы.

Радиус личного пространства j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$):

$$r_j(t_k) = \begin{cases} \hat{r}, & \text{если } \rho_j(t_k) = 1, \\ \frac{\hat{r}}{(\rho_j(t_k))^\eta}, & \text{если } 1 < \rho_j(t_k) < \bar{\rho}, \\ \frac{\gamma \hat{r}}{(\rho_j(t_k))^\eta}, & \text{если } \bar{\rho} \leq \rho_j(t_k) < \bar{\bar{\rho}} \\ 0, & \text{если } \bar{\bar{\rho}} \leq \rho_j(t_k). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь \hat{r} — начальное значение радиуса личного пространства агента, соответствующее нормальному состоянию плотности окружающего пространства (при отсутствии паники); $0 \leq \eta \leq 1$ — некоторый фиксированный коэффициент ($\eta = 0,2$); γ — значение коэффициента сжатия (расширения) личного пространства агента, соответствующее состоянию высокой плотности окружающего пространства (при наличии паники); $\{\bar{\rho}, \bar{\bar{\rho}}\}$ — пороговые значения плотностей окружающего пространства, определяющие состояния возникновения паники и "давки" (аварии ТС) соответственно. График радиуса личного пространства представлен на рис. 1.

Таким образом, поведение транспортных средств в потоке зависит от плотности окружающего пространства. При увеличении плотности потока радиус личного пространства агента сжимается (то есть происходит уплотнение транспортного потока). Однако после достижения некоторого порогового значения плотности ($\bar{\rho}$) радиус личного пространства агента существенно увеличивается у ОТС вследствие возникновения паники и частично уменьшается у наземных БТС вследствие предопределенного стремления избежать столкновения с уплотнившимся транспортным потоком.

Далее будем рассматривать движение ансамбля как ОТС, так и БТС в некотором двумерном пространстве, представляющем собой комбинацию из кругового движения с двумя въездами и двумя съездами с круга (рис. 2).

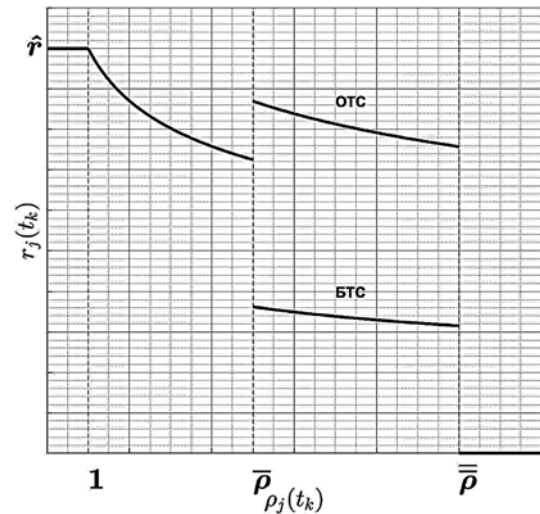


Рис. 1. График радиуса личного пространства

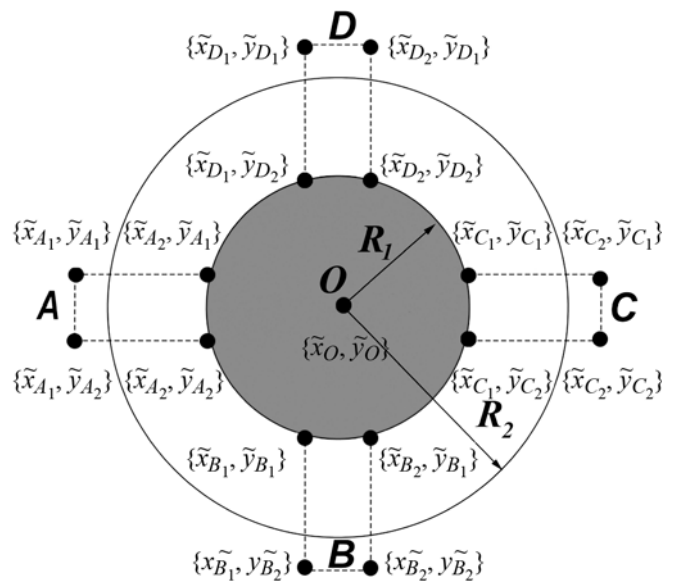


Рис. 2. Конфигурация пространства движения обычных и беспилотных ТС

На рис. 2 буквами **A**, **B** обозначены зоны въезда на круг, а буквами **C**, **D** — зоны съезда с круга для БТС и ОТС соответственно.

При этом задаются координаты центра зоны кругового движения $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ и следующие координаты зон въезда на круг:

$$A(\{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_1}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_2}\}),$$

$$B(\{\hat{x}_{B_1}, \hat{y}_{B_2}\}, \{\hat{x}_{B_1}, \hat{y}_{B_1}\}, \{\hat{x}_{B_2}, \hat{y}_{B_1}\}, \{\hat{x}_{B_2}, \hat{y}_{B_2}\})$$

и выезда с круга:

$$C(\{\hat{x}_{C_1}, \hat{y}_{C_2}\}, \{\hat{x}_{C_1}, \hat{y}_{C_1}\}, \{\hat{x}_{C_2}, \hat{y}_{C_1}\}, \{\hat{x}_{C_2}, \hat{y}_{C_2}\}),$$

$$D(\{\hat{x}_{D_1}, \hat{y}_{D_2}\}, \{\hat{x}_{D_1}, \hat{y}_{D_1}\}, \{\hat{x}_{D_2}, \hat{y}_{D_1}\}, \{\hat{x}_{D_2}, \hat{y}_{D_2}\}),$$

а также радиусы внутреннего R_1 и внешнего R_2 пространства размещения агентов, определяю-

щие зону кругового движения, доступную для ТС. Для каждого j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$), находящегося на круге в нормальном (т.е. неаварийном) состоянии в каждый момент времени t_k ($t_k \in T$), действует ограничение: $R_1 < d_{jO}(t_k) < R_2$, где $d_{jO}(t_k)$ — евклидово расстояние от j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$), до центра зоны кругового движения с координатами $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$). В случае невыполнения данного условия соответствующий агент находится либо в состоянии въезда на круг, либо выезжает с круга, либо находится в аварийном состоянии.

Пусть

- $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$ — координаты ОТС или БТС ($i \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $s_i(t_k) \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ — возможные состояния ОТС или БТС ($i \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$): 0 — круговое движение, 1 — аварийное состояние (ДТП), 2 — въезд на круг, 3 — съезд с круга, 4 — конечное состояние выезда из зоны кругового движения.

Совокупный трафик, определяющий общее число ТС, покинувших зону кругового движения к конечному моменту времени $|T|$:

$$N = \sum_{t_k=1}^{|T|} \left(\sum_{i \in I} n_i(t_k) + \sum_{i \in \tilde{I}} \tilde{n}_i(t_k) \right), \quad (4)$$

где

$$n_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_i(t_k) > \hat{y}_{D_1} \text{ и } s_i(t_{k-1}) = 3, \\ 0, & \text{если } y_i(t_k) \leq \hat{y}_{D_1} \text{ и } s_i(t_{k-1}) \neq 3; \end{cases}$$

$$\tilde{n}_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i(t_k) > \hat{x}_{C_2} \text{ и } s_i(t_{k-1}) = 3, \\ 0, & \text{если } x_i(t_k) \leq \hat{x}_{C_2} \text{ и } s_i(t_{k-1}) \neq 3, \end{cases}$$

$t_k \in T$.

Будем считать, что все аварии (ДТП) обусловлены двумя причинами:

- *столкновением ОТС* во время кругового движения, а также при попытках въезда и выезда из зоны кругового движения, т.е. $s_i(t_k) = 1$ ($i \in I$), если существует хотя бы один j -й агент ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), для которого расстояние между ними удовлетворяет условию $d_{ij}(t_k) < \underline{r}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$), где \underline{r} — минимально допустимое расстояние между агентами без столкновения. Аналогичное правило выполняется и для БТС, т.е. $s_i(t_k) = 1$ ($i \in \tilde{I}$), если существует хотя бы один j -й агент ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), для которого евклидово расстояние между ними также удовлетворяет условию $d_{ij}(t_k) < \underline{r}$ в момент времени t_k .
- *выталкиванием ТС* за зону кругового движения вследствие возникновения эффектов

"турбулентности" и "давки", обусловленных высокой плотностью транспортного потока, т.е. $s_i(t_k) = 1$, если евклидово расстояние $d_{iO}(t_k)$ между i -м агентом ($i \in I \cup \tilde{I}$) и центром зоны кругового движения с координатами $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ удовлетворяет условиям: ($d_{iO}(t_k) < R_1$ или $d_{iO}(t_k) > R_2$) и $s_i(t_{k-1}) = 0$.

Число аварий (ДТП), случившихся к конечному моменту времени $|T|$:

$$M = \sum_{t_k=1}^{|T|} \left(\sum_{i \in I \cup \tilde{I}} m_i(t_k) \right), \quad (5)$$

где

$$m_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_i(t_{k-1}) = 1 \text{ и } s_i(t_{k-2}) = 0 \\ \text{при } k > 1; \\ 0, & \text{если } s_i(t_{k-1}) \neq 1. \end{cases}$$

Важным отличием индивидуальных правил принятия решений для БТС является периодическая передача информации о состоянии каждого i -го агента ($i \in \tilde{I}$) всем другим БТС. В случае, если данное БТС находится в аварийном состоянии (т.е. $s_i(t_k) = 1$) или находится в непосредственной близости от ДТП, то точные координаты данного агента высылаются другим агентам с заданной интенсивностью $0 \leq f_i \leq 1$. При этом время между передачей подобных сообщений является случайной величиной с экспоненциальным распределением со средним значением $1/f_i$.

Пусть

- $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ — координаты j -го ($j \in \tilde{I}$) агента-БТС, находящегося в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$), информация о котором известна всем другим БТС, в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ — ориентировочные координаты j -го ($j \in I$) агента-ОТС, находящегося в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$), информация о котором известна БТС, в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $d_{ij}(t_k)$ — евклидово расстояние между БТС ($i \in \tilde{I}$), находящимся в нормальном состоянии ($s_i(t_k) = 0$), и ближайшим БТС ($j \in \tilde{I}$), находящимся в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$);
- $d_{ij}(t_k)$ — евклидово расстояние между БТС ($i \in \tilde{I}$), находящимся в нормальном состоянии, и приблизительными ближайшими координатами возникновения ДТП с участием ОТС ($j \in I$). Координаты подобных ДТП определяются БТС в случае нахождения в зоне прямой видимости от соответствующих аварий;
- \bar{R} — пороговое расстояние (для принятия решения о корректировке маршрута и тор-

можения) между БТС находящимся в нормальном и БТС, находящимся в аварийном состоянии ($\bar{R} \gg r_i, i \in \tilde{I}$), с известными координатами $\{\hat{x}_j(t_k), \hat{y}_j(t_k)\}$ ($j \in \tilde{I}, t_k \in T$);

- \bar{R} — пороговое расстояние (для принятия решения о торможении) между БТС, находящимся в нормальном состоянии, и предполагаемым местом возникновения ДТП с участием ОТС ($\bar{R} \gg r_i, i \in \tilde{I}$), с известными координатами $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ ($j \in I, t_k \in T$);
- $g_i(t_k) \in [\hat{g}_i(t_k) - \delta g, \hat{g}_i(t_k) + \delta g]$ — скорость перемещения i -го агента ($i \in I$) (ОТС), представляющая собой случайную величину, равномерно распределенную на отрезке $[\hat{g}_i(t_k) - \delta g, \hat{g}_i(t_k) + \delta g]$, $\hat{g}_i(t_k)$, δg — предпочтительная скорость и максимальное отклонение от этой скорости для ОТС соответственно;
- $g_i(t_k) \in N(\hat{h}_i(t_k), \delta h)$ — скорость перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$) (БТС), представляющая собой случайную величину, распределенную по гауссовскому закону с математическим ожиданием $\hat{h}_i(t_k)$ и дисперсией δh ;
- $\{\lambda, \tilde{\lambda}\}$ — коэффициенты, определяющие соотношения масштабов реального и виртуального модельного времени для ОТС и БТС соответственно для каждого временно-го интервала $[t_k, t_{k+1}]$ ($t_k \in T$);
- $\{c_1, c_2\}$ — коэффициенты, определяющие интенсивность изменения направления движения (нежелание двигаться в данном направлении) соседних агентов друг от друга и от места возникновения ДТП (для БТС) соответственно;

С учетом введенных обозначений, пространственная динамика обычного i -го агента ($i \in I$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) задается следующей системой разностных уравнений с переменной структурой, при этом агенты в состоянии $s_i(\xi) = 4$ на следующем шаге перестают присутствовать в системе:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ \hat{x}_O + d_{iO}(t_{k-1}) \cos \alpha_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ x_i(t_{k-1}) + \cos(\alpha_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \\ 0, & \text{если выполняется V,} \end{cases} \quad (6)$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}) - \lambda g_i, & \text{если выполняется I,} \\ \hat{y}_O + d_{iO}(t_{k-1}) \sin \alpha_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ y_i(t_{k-1}) + \sin(\alpha_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \\ 0, & \text{если выполняется V,} \end{cases} \quad (7)$$

где

- $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 3\}$,
- $d_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$,
- $d_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$,
- $s_i(t_{k-1}) = 1$,
- $s_i(t_{k-1}) = 4$.

Дирекционный угол перемещения i -го агента ($i \in I$), находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$:

$$\alpha_i(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \lambda \frac{g_i}{d_{iO}(t_{k-1})}, \quad (8)$$

где

$$\beta_{iO}(t_{k-1}) = \arctan \frac{y_i(t_{k-1}) - \hat{y}_O}{x_i(t_{k-1}) - \hat{x}_O}. \quad (9)$$

Угол смещения i -го агента ($i \in I$) для объезда ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}, j \neq i$) равен

$$\omega_{ij}(t_{k-1}) = \frac{\pi}{4} + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \sin \frac{\pi}{4}}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \cos \frac{\pi}{4}} \right|. \quad (10)$$

Угол "отскока" i -го агента ($i \in I$) от ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}, j \neq i$) составляет

$$\gamma_{ij}(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|. \quad (11)$$

Отметим, что в отличие от ОТС БТС характеризуются более сложной системой принятия решений, учитывающей возможности периодического обмена данными с другими роботизированными участниками дорожного движения, обеспечивающего, в частности, наличие полной или частичной информации

о складывающейся ситуации (например о местах возникновения ДТП).

С учетом вышеизложенного пространственную динамику беспилотного i -го агента ($i \in \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) можно описать следующей системой разностных уравнений с переменной структурой:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}) + \tilde{\lambda} g_i, & \text{если выполняется VI;} \\ \hat{x}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \cos \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VII;} \\ x_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \cos \tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VIII;} \\ x_i(t_{k-1}) + \cos(\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{(12)} \\ \text{если выполняется IX;} \\ x_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется X;} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI;} \\ 0, & \text{если выполняется XII;} \end{cases}$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется VI;} \\ \hat{y}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \sin \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VII;} \\ \hat{y}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \sin \tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VIII;} \\ y_i(t_{k-1}) + \sin(\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{(13)} \\ \text{если выполняется IX;} \\ y_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется X;} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI;} \\ 0, & \text{если выполняется XII,} \end{cases}$$

где

VI. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 3\}$;

VII. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ и $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ для всех $j \in \tilde{I}$, $l \in I$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$, $s_l(t_{k-1}) = 1$;

VIII. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$, $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq \tilde{R}$ для ближайшего $j \in I$, $s_j(t_{k-1}) = 1$;

IX. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и

$\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ и $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ для всех $j \in \tilde{I}$, $l \in I$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$, $s_l(t_{k-1}) = 1$;

X. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и

$\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq \tilde{R}$ для ближайшего $j \in \tilde{I}$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$;

XI. $s_i(t_{k-1}) = 1$;

XII. $s_i(t_{k-1}) = 4$.

Здесь

$\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \tilde{\lambda} \frac{g_i}{\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})}$ — дирекционный угол перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$),

находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$, при условии отсутствия потенциального препятствия в виде ОТС в аварийном состоянии, где

$$\beta_{iO}(t_{k-1}) = \arctan \frac{y_i(t_{k-1}) - \hat{y}_O}{x_i(t_{k-1}) - \hat{x}_O},$$

угол смещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$) для объезда ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$) составляет

$$\omega_{ij}(t_{k-1}) = \frac{\pi}{4} +$$

$$+ \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \sin \frac{\pi}{4}}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \cos \frac{\pi}{4}} \right|;$$

$\tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \tilde{\lambda} \frac{\varpi g_i}{\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})}$ — дирекционный угол перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$),

находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$ при условии нахождения данного агента в районе ДТП с известными координатами $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ ($j \in I$, $t_k \in T$), где ϖ — коэффициент, определяющий уровень снижения средней скорости наземного БТС ($\varpi = 0,1$);

$\gamma_{ij}(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|$ — угол

"отскока" i -го агента ($i \in \tilde{I}$) от ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), находящегося в нормальном состоянии;

$\gamma_{ij}^*(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{\hat{y}_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{\hat{x}_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|$ — угол

"отскока" i -го агента ($i \in \tilde{I}$), находящегося в нормальном состоянии кругового движения ($s_i(t_k) = 0$) от ближайшего j -го БТС ($j \in \tilde{I}$, $j \neq i$), находящегося в аварийном состоянии, с известными координатами $\{\hat{x}_j(t_{k-1}), \hat{y}_j(t_{k-1})\}$ ($j \in \tilde{I}$, $t_k \in T$).

В текущей реализации системы принятия решений как ОТС, так и БТС наиболее существенным фактором выступает расстояние до ближайшего агента. Вместе с тем, для БТС возможны правила принятия решений, основанные на предиктивном анализе состояния всей системы в целом. Такой подход будет реализован в рамках дальнейшего развития модели.

Далее будет представлена программная реализация предложенной модели движения агентов (1)–(13) в AnyLogic.

Программная реализация модели в AnyLogic

Предложенная модель движения наземных ОТС и БТС была реализована в системе имитационного моделирования *AnyLogic*, поддерживающей методы агентного имитационного моделирования. Для реализации правил перехода к различным состояниям ОТС и БТС используются специальные возможности системы *AnyLogic*, относящиеся к применению карт состояний (statecharts). Подобные карты состояний, функционирующие по принципам конечного автомата, позволяют управлять состояниями агентов и переходами между ними на индивидуальном уровне в зависимости от выполнения некоторых условий. Например, "въезд автомобиля на круг" является начальным состоянием данного агента, которое задается в момент его создания как объекта транспортной системы. Далее осуществляется переход к новому состоянию агента — "круговому движению", при условии, что транспортное средство достигло середины проезжей части зоны кругового движения (области *A*, *B* на рис. 2). После того, как агент переместится к одной из зон выезда с кругового движения (области *C*, *D* на рис. 2), его состояние автоматически изменится на состояние "выезд с круга". В случае благоприятного выезда из последней зоны агент переходит в конечное состояние, которое учитывается при оценке трафика выходного потока.

При этом на всех вышеописанных этапах (кроме конечного) агент может перейти в аварийное состояние с соответствующим прекращением движения в случае непосредственного контакта с каким-либо другим агентом либо вытеснения

за зону кругового движения (например, из-за эффекта "турбулентности").

На рис. 3 представлены диаграммы состояний, разработанные ОТС и БТС, реализованные в *AnyLogic*.

Основным отличием системы принятия решений БТС от ОТС (рис. 3) является наличие механизма периодической отправки сообщений об аварийной ситуации (ДТП с участием БТС), если данный агент находится в аварийном состоянии. При этом с заданной интенсивностью передаются данные о точном местоположении соответствующего агента всем другим БТС (по имеющимся каналам связи). Данная информация используется другими агентами для уменьшения риска столкновения с БТС, находящимся в аварийном состоянии, в основном, за счет заблаговременной корректировки маршрута и снижения скорости. Другим важным отличием является поддержка непрерывного анализа дорожной ситуации и отправка сообщений другим БТС в случае, если в зоне прямой видимости данного агента наблюдается ДТП с участием ОТС, либо какая-либо иная экстремальная ситуация (например, "дорожный затор"). При этом остальные БТС используют данную информацию для корректировки наиболее важных собственных характеристик, например средней скорости, при прохождении соответствующей зоны (приблизительного места возникновения ДТП).

Для реализации пространственного перемещения агентов используется дискретно-событийный подход, позволяющий обеспечить выполнение вычислительной процедуры определения новых координат для каждого агента с учетом их множественных взаимодействий

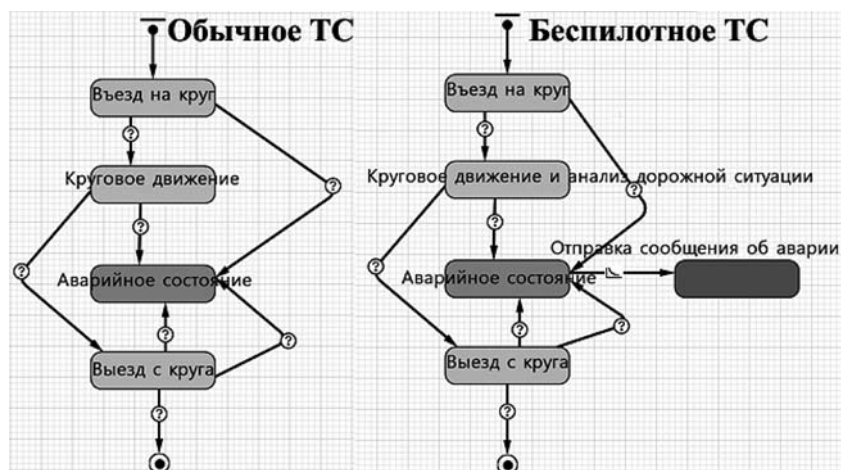


Рис. 3. Диаграммы (карты) состояний обычного и беспилотного ТС

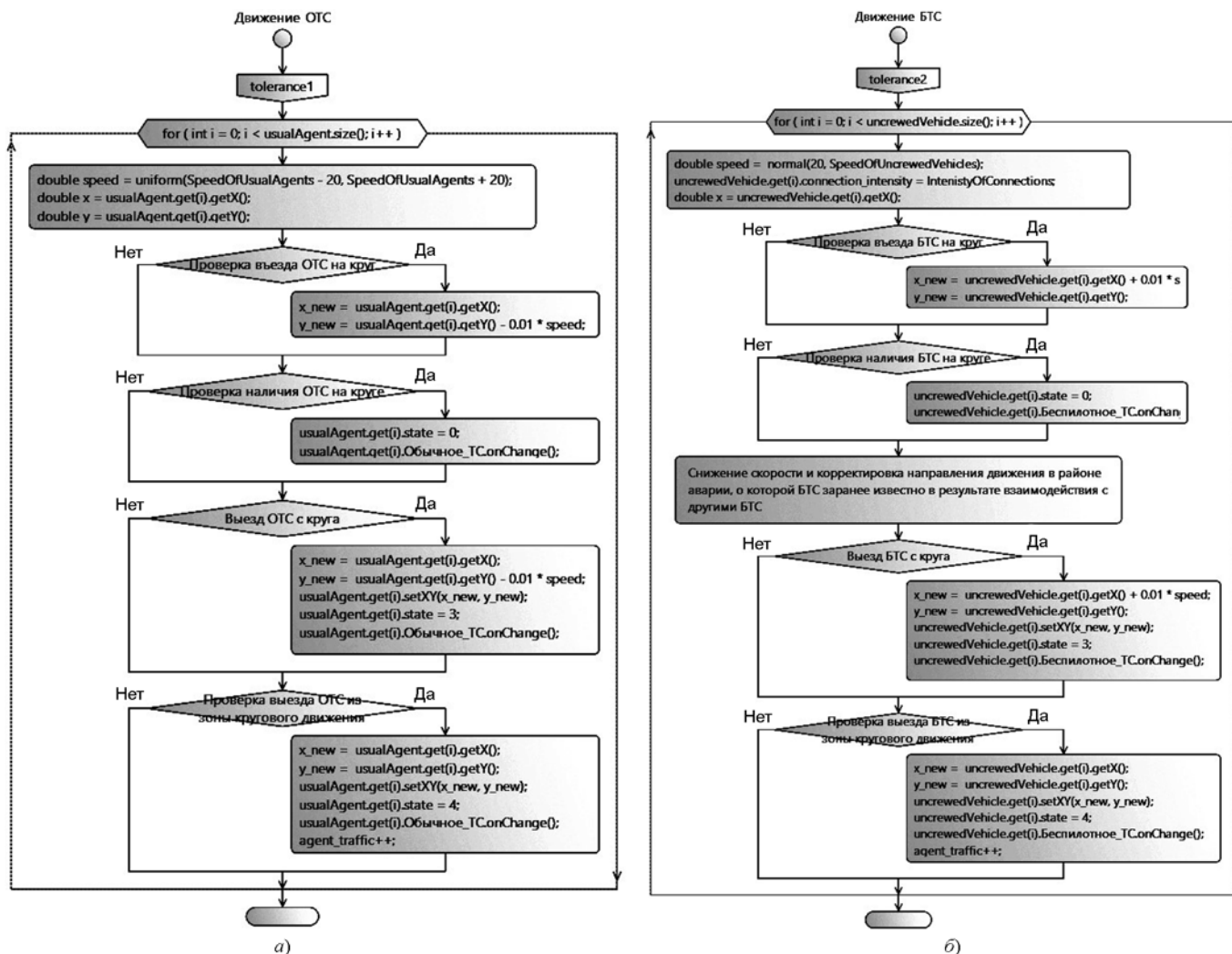


Рис. 4. Фрагмент вычислительной процедуры определения новых координат для агента ОТС (а) и для агента БТС (б) в AnyLogic

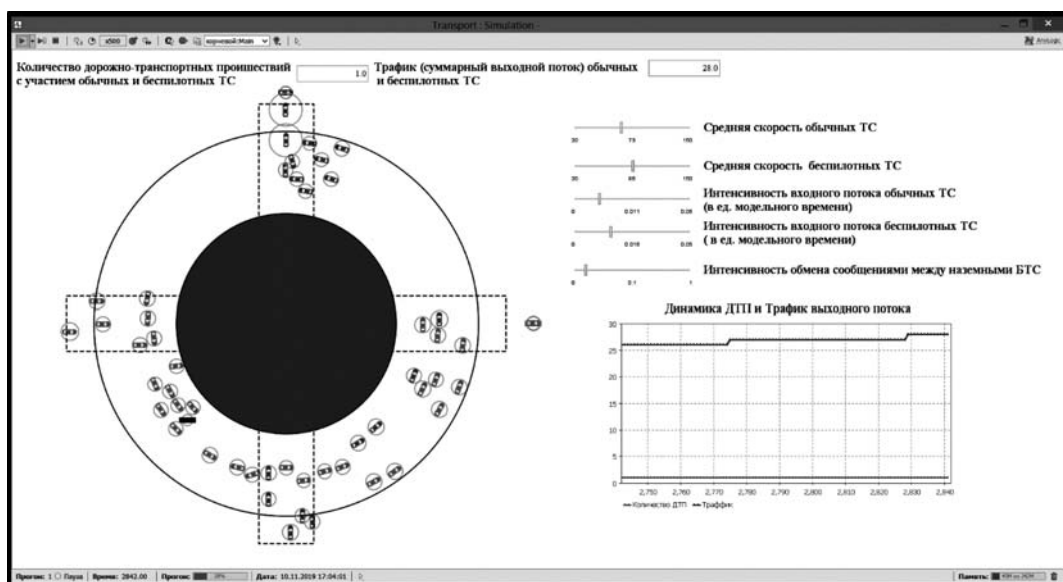


Рис. 5. Панель управления моделью в AnyLogic

(рис. 4, а,б), реализованной в AnyLogic на языке программирования Java.

Отметим, что в рамках предлагаемого подхода в разработанной системе управления наземными БТС были определены следующие основные управляющие параметры:

- средняя скорость ОТС;
- средняя скорость БТС;
- интенсивность входного потока ОТС;
- интенсивность входного потока БТС;
- интенсивность обмена сообщениями между наземными БТС.

Панель управления моделью движения ОТС и БТС представлена на рис. 5.

На рис. 5 видно, что спроектированная система позволяет варьировать значения различных управляющих параметров, оценивать динамику ДТП и трафик выходного потока, а также исследовать эффекты "турбулентности" и "давки" (дорожные заторы), возникающие в условиях высокой плотности транспортных потоков, которые, в свою очередь, зависят от скорости транспортных средств, интенсивностей входных потоков и геометрии пространства дорожного движения.

Далее будут представлены некоторые результаты численных экспериментов с моделью, нацеленные на выявление устойчивых режимов, обеспечивающих безопасный и скоростной трафик.

2. Результаты численных экспериментов

Для моделирования потока ОТС и БТС были использованы некоторые допущения, касающиеся конфигурации пространства дорожного движения и начальных значений основных характеристик агентов. Значения соответствующих параметров модели представлены в табл. 1. Отметим, что характеристики геометрии пространства размещения агентов подобраны таким образом, чтобы обеспечить возникновение множественных ДТП в условиях интенсивного и скоростного дорожного движения ТС.

Далее были исследованы следующие сценарии поведения системы:

- **Сценарий 1. Малоинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии используются базовые значения характеристик агентов, представленные в табл. 1.
- **Сценарий 2. Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии используются базовые значения

Таблица 1

Перечень основных параметров модели и допущений

№	Параметры модели	Значение
Геометрия пространства размещения агентов (в пикселах)		
1	Внутренний радиус зоны кругового движения	200
2	Внешний радиус зоны кругового движения	350
3	Длина съездов и заездов на зону кругового движения	50
4	Ширина съездов и заездов на зону кругового движения	50
Основные характеристики агентов		
5	Исходное число ОТС и БТС, расположенных в зоне кругового движения	10/10
6	Начальная скорость ОТС и БТС (uniform — равномерное распределение, normal — нормальное распределение), км/ч	uniform (40, 80)/normal (20, 60)
7	Начальный радиус личного пространства ОТС и БТС (в пикселах)	20/20
8	Максимальный радиус личного пространства ОТС и БТС в условиях паники и возникновении эффекта "турбулентности"	30/20
9	Размеры проекции агента (ширина и высота, в пикселах)	30 × 10
10	Интенсивность создания агентов (ОТС и БТС), агентов в мин.	0,001
11	Интенсивность обмена сообщениями между БТС, число сообщений в мин.	0,1
12	Соотношение масштабов λ реального и виртуального модельного времени	0,01
13	Коэффициенты c_1, c_2 "отскока" агентов друг от друга при нарушении личного пространства или контакте с авариями БТС соответственно	100
14	Пороговые расстояния \tilde{R}, \tilde{R} для принятия решений о корректировке маршрута и торможении со стороны БТС	100/50
15	Коэффициент ϖ , определяющий уровень снижения средней скорости БТС, при условии нахождения в районе ДТП	0,1

характеристик агентов, представленные в табл. 1, за исключением параметров интенсивности их создания, которые выбираются на уровне 0,01 (как для ОТС, так и БТС).

- **Сценарий 3. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии интенсивности создания агентов выбираются на уровне 0,05 и начальные скорости движения агентов: 150 км/ч.
- **Сценарий 4. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС с неработающими каналами связи.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием коммуникаций

Таблица 2

Результаты имитационного моделирования

Сценарий	Совокупный трафик (число агентов выходного потока)	Число ДТП (число агентов в аварийном состоянии)
Сценарий 1. Малоинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС	40	0
Сценарий 2. Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС	185	0
Сценарий 3. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС	360	460
Сценарий 4. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС с неработающими каналами связи	297	673
Сценарий 5. Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке	424	18
Сценарий 6. Использование только ОТС в интенсивном и высокоскоростном потоке	339	93

между БТС (интенсивность обмена сообщения между БТС равна 0).

- **Сценарий 5. Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием ОТС и высокой интенсивностью обмена сообщениями между БТС (примерно 1 сообщение в минуту).
- **Сценарий 6. Использование только ОТС в интенсивном и высокоскоростном потоке.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием БТС.

Результаты имитационного моделирования в виде усредненных значений исследуемых характеристик, полученных в результате множественных (не менее 100) экспериментов, для каждого рассматриваемого сценарий при $|T| = 10\ 000$ представлены в табл. 2.

В табл. 2, выделены наиболее важные сценарии, в частности, **Сценарий 2** "Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС" и **Сценарий 5** "Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке". В первом случае обеспечивается гарантированно безопасный и достаточно скоростной режим функционирования БТС в общем (смешанном) потоке транспортных средств. Во втором случае (использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке) возможно дости-

жение принципиального снижения числа ДТП и увеличения трафика по сравнению с другими сценариями, предполагающими экстремальные характеристики системы дорожного движения. Однако подобный эффект достижим только при условии бесперебойной работы каналов связи, действующих между БТС.

Заключение

В данной статье представлен новый подход к разработке систем управления наземными БТС, основанный на использовании методов агентного моделирования.

Разработана новая модель движения ансамбля ОТС и БТС, обеспечивающая реализацию правил поведения и взаимодействия соответствующих агентов на индивидуальном уровне (см. рис. 2). Особенностью данной модели является использование дифференциальных уравнений с переменной структурой для моделирования пространственной динамики ОТС и БТС. Подобная модель позволяет исследовать эффекты "турбулентности" и "давки" (дорожных заторов), в частности возникающие в условиях плотного дорожного потока.

Выполнена программная реализация предложенной модели движения наземных ОТС и БТС в системе *AnyLogic*, поддерживающей методы агентного имитационного моделирования. Для реализации правил перехода к различным состояниям ОТС и БТС используются специальные возможности *AnyLogic*, относящиеся к применению карт состояний агентов (см. рис. 3). Для обеспечения пространственной динамики ТС использовался дискретно-событийный подход с реализацией соответствующей вычислительной процедуры, написанной на языке программирования Java (рис. 4).

Исследованы различные сценарии поведения разработанной системы управления наземными БТС, в частности подтверждающие основные преимущества использования БТС и относящиеся в основном к обеспечению безопасного и скоростного потока ТС, но только в условиях бесперебойной работы каналов связи (табл. 2).

Список литературы

1. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. 2000. N. 407. P. 487–490.
2. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical review E. 1995. Vol. 51, N. 5. P. 4282–4286.
3. Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study // Physical review E. 2007. Vol. 75, N. 4. P. 0461091–0461097.

4. **Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z.** Crowd turbulence: The physics of crowd disasters, in: *The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics (ICNM-V)*, Shanghai, 2007. P. 967–969.

5. **Treiber M., Helbing D.** An Adaptive Smoothing Method for Traffic State Identification from Incomplete // *Interface and Transport Dynamics: Computational Modelling*. 2003. Vol. 32. P. 343–360.

6. **Kerner B. S.** Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 81, N. 17. P. 3797–3800.

7. **Treiber M., Kesting A., Helbing D.** 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. Vol. 44, N. 8–9. P. 983–1000.

8. **Kesting A., Treiber M., Helbing D.** Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*. 2010. Vol. 11, N. 1. P. 172–181.

9. **Цветков В. Я.** Интегральное управление высокоскоростной магистралью // *Мир транспорта*. 2013. Т. 11, № 5 (49). С. 6–9.

10. **Михеева Т. И., Михеев С. В., Головин О. К., Сапрыкин О. Н.** Паттерны проектирования сложноорганизованных систем. Самара, Интелтранс. 2015. 216 с.

11. **Акопов А. С., Beklaryan L. A.** An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies // *Automation and Remote Control*. 2015. Vol. 76, N. 10. P. 1817–1827.

12. **Акопов А. С., Beklaryan L. A.** Simulation of human crowd behavior in extreme situations // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2012. Vol. 79, N. 1. P. 121–138.

13. **Antonini G., Bierlaire M., Weber M.** Discrete choice models of pedestrian walking behavior // *Transportation Research Part B*. 2006. Vol. 40, N. 8. P. 667–687.

14. **Beklaryan A. L., Akoпов A. S.** Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering, in *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016. P. 1275–1276.

A. S. Akoпов^{1,2}, Professor, e-mail: aakopov@hse.ru, **L. A. Beklaryan²**, Professor, e-mail: beklar@cemi.rssi.ru, **N. K. Khachatryan^{1,2}**, Associate Professor, e-mail: nerses@cemi.rssi.ru, nkachatryan@hse.ru, **A. L. Beklaryan¹**, Associate Professor, e-mail: abeklaryan@hse.ru, **E. V. Kuznetsova¹**, Associate Professor, e-mail: ev.kuznetsova@hse.ru
¹National Research University Higher School of Economics, Moscow
²Central Economics and Mathematics Institute RAS, Moscow,

Multi-Agent Control System for Unmanned Ground Vehicles

This article presents a ground-based unmanned vehicles (UV) control system developed using agent-based simulation methods (supported by AnyLogic). An important feature of such a system is the ability to assess the influence of various parameters (such as average initial speeds, input stream intensities, frequency of data exchange between BTS agents, etc.) on the behavior and condition of unmanned and conventional vehicles in a dense stream. The effects of "turbulence" and "traffic congestion", caused usually by a high density of vehicles and the occurrence of road traffic accidents, are investigated. The software implementation of the developed simulation model in the AnyLogic IDE was performed and numerical experiments were carried out. The modes are found that ensure safe and high-speed movement of vehicles in a dense stream.

Keywords: multi-agent system, unmanned transport systems, intelligent transportation system, AnyLogic

Acknowledgements: Thereported study was funded by RFBR, project number 19-29-06003.

DOI: 10.17587/it.26.342-353

References

1. **Helbing D., Farkas I., Vicsek T.** Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, 2000, no. 407, pp. 487–490.

2. **Helbing D., Molnar P.** Social force model for pedestrian dynamics, *Physical review E*, 1995, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286.

3. **Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z.** Dynamics of crowd disasters: An empirical study, *Physical review E*, 2007, vol. 75, no. 4, pp. 0461091–0461097.

4. **Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z.** Crowd turbulence: The physics of crowd disasters, *The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics (ICNM-V)*, Shanghai, 2007, pp. 967–969.

5. **Treiber M., Helbing D.** An Adaptive Smoothing Method for Traffic State Identification from Incomplete, *Interface and Transport Dynamics: Computational Modelling*, 2003, vol. 32, pp. 343–360.

6. **Kerner B. S.** Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow, *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81, no. 17, pp. 3797–3800.

7. **Treiber M., Kesting A., Helbing D.** 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, vol. 44, no. 8–9, pp. 983–1000.

8. **Kesting A., Treiber M., Helbing D.** Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 172–181.

9. **Cvetkov V. Ja.** Integral'noe upravlenie vysokoskorostnoj magistral'ju, *Mir Transporta*, 2013, vol. 11, no. 5 (49), pp. 6–9 (in Russian).

10. **Miheeva T. I., Miheev S. V., Golovnin O. K., Saprykin O. N.** Patterny proektirovaniya slozhnoorganizovannyh sistem, Samara, Inteltrans, 2015, 216 p. (in Russian).

11. **Акопов А. С., Beklaryan L. A.** An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies, *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 10, pp. 1817–1827.

12. **Акопов А. С., Beklaryan L. A.** Simulation of human crowd behavior in extreme situations, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2012, vol. 79, N. 1, pp. 121–138.

13. **Antonini G., Bierlaire M., Weber M.** Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 667–687.

14. **Beklaryan A. L., Akoпов A. S.** Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering, *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016, pp. 1275–1276.