



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 54 за 2022 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

М.А. Трапезникова, А.А. Чечина,
Н.Г. Чурбанова, А.Г. Гарибян

Учебная программная
платформа для
моделирования и
визуализации движения
автомобильного транспорта

Статья доступна по лицензии
Creative Commons Attribution 4.0 International



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Учебная программная платформа для моделирования и визуализации движения автомобильного транспорта / М.А. Трапезникова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 54. 19 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-54>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-54>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**М.А. Трапезникова, А.А. Чечина, Н.Г. Чурбанова,
А.Г. Гарибян**

**Учебная программная платформа
для моделирования и визуализации
движения автомобильного транспорта**

Москва — 2022

Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Гарибян А.Г.

Учебная программная платформа для моделирования и визуализации движения автомобильного транспорта

Препринт посвящен разработке интерактивной программы для моделирования потоков автомобильного транспорта, которая может быть использована в учебном процессе. Приведён краткий обзор существующих в настоящее время программных решений для транспортного моделирования, а также продуктов для поддержки компьютерных методов обучения. Описаны оригинальные модели макро- и микроскопического типов, положенные в основу учебной платформы. Особое внимание уделяется разработке средств динамической интерпретации результатов моделирования с использованием среды Unity, которая интегрируется с Microsoft Visual Studio.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, квазигазодинамическая модель, модель клеточных автоматов, графический интерфейс, динамическая визуализация

Trapeznikova Marina Aleksandrovna, Chechina Antonina Aleksandrovna, Churbanova Natalia Gennadievna, Garibyan Alla Gevorkovna

Educational software platform for modeling and visualization of road transport movement

The preprint is devoted to the development of the interactive program for traffic flow modeling, which can be used in the educational process. A brief overview of currently existing software solutions for transport modeling, as well as products to support computer learning methods, is given. The original models of macro- and microscopic types, which form the basis of the educational platform, are described. Particular attention is paid to the development of tools for dynamic interpretation of simulation results using the Unity environment, which is integrated with Microsoft Visual Studio.

Key words: traffic flow modeling, quasigasdynamic model, cellular automata model, graphic interface, dynamic visualization

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 20-07-00528-А.

Введение

В настоящее время теория транспортных потоков является самостоятельным научным направлением, в основе которого — так называемая физика транспортных потоков, математическое и имитационное моделирование. Математические модели трафика используются как в исследовательской, так и в практической деятельности для обоснования планирования и принятия управленческих решений в транспортной отрасли.

Препринт посвящен разработке интерактивной программы для моделирования потоков автомобильного транспорта, которая может быть использована в учебном процессе. Приведён краткий обзор существующих в настоящее время программных решений для транспортного моделирования, а также продуктов для поддержки компьютерных методов обучения.

Авторами препринта ранее были предложены оригинальные математические модели многополосного движения автотранспорта. Макроскопическая модель рассматривает транспортный поток как движение слабосжимаемого газа и использует идеологию кинетически-согласованных разностных схем и квазигазодинамической (КГД) системы уравнений [1]. Микроскопическая модель основана на теории клеточных автоматов (Cellular Automata – CA), адаптированной к моделированию потоков транспорта на многополосных магистралях [2].

Эти модели положены в основу новой интерактивной программы. Актуальность работы объясняется необходимостью предсказательного моделирования при решении проблем организации дорожного движения в условиях всё возрастающих объёмов трафика. Разрабатываемая программная платформа в основном носит учебный характер. При её создании обобщен опыт преподавания теории транспортных потоков на базовой кафедре «Математическое моделирование сложных социально-технических систем» МАДИ в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. В наши дни ценность такого программного продукта возрастает в связи с всё большим внедрением информационных, в том числе дистанционных, технологий в образование.

Краткое описание состояния в области исследований

На сегодняшний день существует огромное количество программных решений для транспортного моделирования. Например, продолжают развиваться пакеты, обзор которых дан в сборнике [3]. Наиболее известными среди коммерческих пакетов являются:

- PTV Vision Traffic Suite [4];
- Aimsun (TSS—Transport Simulation Systems) [5].

Имеется также свободное программное обеспечение с открытым исходным кодом, например:

- MATSim [6, 7];

- Eclipse SUMO [8, 9].

PTV Vision Traffic Suite включает продукты: PTV Visum (стратегическое планирование, расчет спроса на транспорт, анализ транспортной сети городов, мегаполисов, стран и регионов на основе макро моделирования), PTV Vissim (имитационное моделирование дорожного движения, проверка гипотез по организации дорожного движения), PTV Viswalk (имитационное моделирование пешеходных потоков, планирование массовых мероприятий, разработка эвакуационных планов), PTV Vistro (работа на сетевом уровне с учётом сразу несколько видов пересечений – регулируемых и нерегулируемых, оптимизация режимов регулирования).

Aimsun в настоящее время превратился из микросимулятора в полностью интегрированное приложение для моделирования дорожного движения, которое объединяет прогноз спроса на поездки, макроскопические функции и мезоскопический-микроскопический гибридный симулятор.

Продукты PTV и Aimsun реализованы для операционной системы Windows.

MATSim основан на мультиагентном подходе для крупномасштабного транспортного моделирования, состоит из нескольких модулей, которые можно комбинировать или использовать по отдельности. Модули могут быть заменены пользовательскими реализациями.

SUMO является академической разработкой для моделирования транспортных систем, включающих автомобили, общественный транспорт и пешеходов. Программы основаны на микроскопическом подходе. В состав SUMO входит множество вспомогательных инструментов, которые автоматизируют основные задачи и позволяют осуществлять импорт сети, расчет маршрута, визуализацию, а также расчет выбросов загрязняющих веществ и расчет шума. SUMO можно дополнить настраиваемыми моделями и предоставить интерфейсы для удаленного управления моделированием. Отличительные черты SUMO – переносимость (portability) и расширяемость (extensibility). Разработаны версии пакета для ряда популярных операционных систем, в частности для Linux.

Отметим, что существуют также программные пакеты для реализации концепции BIM, 3D моделирования и создания цифровых двойников в области комплексного проектирования дорог и транспортной инфраструктуры, в частности продукты компании Bentley Systems [10], среди которых OpenRoads и OpenCities Planner.

Таким образом, в мире накоплен уже достаточно большой опыт по моделированию транспортных потоков, разработаны эффективные программные средства, которые становятся неотъемлемой частью как краткосрочного, так и долгосрочного транспортного планирования, закладывают основу интеллектуальных транспортных систем. В связи с этим насущной задачей является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих соответствующими знаниями и умениями и способных

осуществлять дальнейшее развитие теории транспортных потоков и её прикладных аспектов.

Разрабатываемая программная платформа может рассматриваться как учебный продукт для поддержки преподавания в технических вузах дисциплин, связанных с моделированием сложных социально-технических, в том числе транспортных, систем и управлением ими. Эта программа позволит студентам отрабатывать практические навыки в ходе лабораторных работ по численной реализации моделей трафика, выполнению расчётов транспортных задач с возможностью наглядного представления результатов.

Уже более двадцати лет в мире развивается концепция электронного обучения (E-learning) как система обучения при помощи информационных и электронных технологий, по определению ЮНЕСКО – «обучение с помощью Интернет и мультимедиа» [11, 12].

В современных условиях всё большую роль играют компьютерные методы обучения, в том числе системы дистанционного обучения (СДО), в рамках которых создаются инновационные учебные продукты, такие как виртуальные и сетевые лаборатории.

Виртуальная учебная лаборатория – это программный комплекс, обеспечивающий проведение лабораторных работ в виртуальной среде в условиях локальной сети компьютерного класса универсального назначения. Как методическая, так и экономическая целесообразность этой формы обучения очевидна. Визуальная составляющая виртуальной среды синтезируется на экране персонального компьютера в виде динамической сцены с возможностью интерактивного взаимодействия пользователя с наблюдаемыми элементами текущей сцены. Таким образом, поведение объектов реального мира динамически отображается в компьютерной среде, при этом разработчики стремятся максимально реалистично визуализировать отображаемые процессы.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество продуктов для поддержки компьютерных методов обучения. Среди них следует отметить разработанную Национальным исследовательским Томским политехническим университетом Среду электронного обучения [13], включающую сетевые электронные учебно-методические комплексы, виртуальные лабораторные комплексы (ВЛК), лекционные видеокурсы, электронные пособия и многое другое. Разработано порядка пятидесяти ВЛК по различным дисциплинам. ВЛК в основном поддерживают доступ on-line, веб-приложения работают с помощью мультимедийного проигрывателя и оснащены собственной базой данных для хранения экспериментальных результатов.

Также примечательны продукты компании "Профессиональная группа", история которой началась с организации в Тюменском государственном нефтегазовом университете Центра дистанционного образования. Компания предлагает для образовательных учреждений и коммерческих организаций более 100 виртуальных лабораторий, компьютерных имитационных тренажеров

и автоматизированных обучающих систем по таким дисциплинам, как физика, химия, гидромеханика, детали машин, машиностроение, метрология, сопротивление материалов, теоретическая механика, теплотехника, электротехника и др. [14].

В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН тоже имеется опыт создания сетевой компьютерной лаборатории (СКЛ) как единого информационного пространства для образовательной и исследовательской деятельности. Данная СКЛ является интегрированной средой прикладного моделирования сложных процессов аэромеханики [15, 16]. При разработке СКЛ был обобщён опыт создания системы дифференцированного Интернет-обучения ГЕКАДЕМ в Иркутском государственном университете [17, 18].

Однако при всём многообразии учебных программ и прикладных пакетов для транспортного моделирования продуктов, подобных предложенному в данной работе, нет. Во-первых, сама по себе дисциплина «Теория транспортных потоков» ещё не нашла достаточного отражения в учебных программах, а во-вторых, разрабатываемая платформа наполнена оригинальным научным содержанием, а именно, реализует новые математические модели транспортных потоков, разработанные в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Макро- и микроскопические модели в основе разрабатываемой программы

Квазигазодинамическая модель транспортных потоков

Модели макроскопического типа описывают движение автотранспорта по аналогии с газодинамическим течением. Следовательно, основой моделей служит система уравнений газовой динамики. Авторами препринта ранее была разработана двумерная многополосная макроскопическая модель транспортных потоков, построенная по аналогии с КГД системой уравнений [19]. КГД система была создана для описания газодинамических течений в широком диапазоне чисел Маха, в том числе хорошо зарекомендовала себя при моделировании существенно дозвуковых течений. Поэтому естественно было использовать ее при построении модели транспортных потоков в приближении сплошной среды. Уравнения КГД системы, в отличие от традиционных газодинамических уравнений, содержат в правой части дополнительные диффузионные члены. В случае транспортных потоков их можно рассматривать как естественную вязкость, позволяющую сглаживать решения при больших градиентах и при численной реализации использовать сквозной счет, без выделения особенностей.

Отличительной чертой многополосной модели является наличие в системе уравнения для «поперечной» компоненты скорости, которая имеет смысл скорости перестроения из полосы в полосу. Поэтому модель может быть

использована для моделирования движения по трассе с учетом ее реальной геометрии. Многополосность и изменение числа полос учитываются путем задания конкретной вычислительной области, а не при помощи источников в правых частях уравнений. Подробное описание КГД модели транспортных потоков содержится в работах [1, 20, 21]. Система уравнений предложенной модели выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2 + P_x) - f_x + \frac{\partial}{\partial y}(\rho UV) \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho V^2 + P_y) - f_y + \frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2 + P_x) - f_x + \frac{\partial}{\partial y}(\rho UV) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho U^3 + 3P_x U) - 3f_x U \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho UV^2 + P_y U) - f_y U \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho U^2 V + P_y V) - f_y V \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2 V + P_x V) - f_x V \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V^2 + P_y) - f_y + \frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2 V + P_x V) - f_x V \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho V^3 + 3P_y V) - 3f_y V \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho V^2 U + P_y U) - f_y U \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho V^2 U + P_x U) - f_x U \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь использованы следующие обозначения: ρ – плотность транспортного потока, U – продольная, вдоль дороги, компонента скорости, V – поперечная компонента скорости (скорость перестроения), $P = \lambda \rho^\beta / \beta$ – аналог давления, $f = a \cdot \rho$ – сила ускорения или замедления, где $a = (U_{eq} - U) / T$ – ускорение.

Равновесная продольная скорость вычисляется согласно параболической фундаментальной диаграмме: $U_{eq} = U_{free} (1 - \rho / \rho_{jam}) / T$.

$T = t_0 \left(1 + r \rho / (\rho_{jam} - r \rho) \right)$ – можно рассматривать как время релаксации.

Уравнения также дополняет ряд феноменологических констант.

Приведенная система содержит уравнение для поперечной скорости, аналогичное уравнению продольной скорости. Однако проведенные тестовые расчеты показали, что более удобным является использование вместо дифференциального уравнения (3) алгебраического уравнения:

$$V_l = k_u \rho \frac{\partial U}{\partial y} - k_\rho U \frac{\partial \rho}{\partial y} + k_{des} \frac{U^2}{(x_{des} - x)^2} (y_{des} - y), \quad (4)$$

где первое слагаемое соответствует желанию водителя ехать с большей скоростью, второе – желанию ехать по полосе с меньшей плотностью и третье – достичь определенной цели. Здесь k_u, k_ρ, k_{des} – константы, (x_{des}, y_{des}) – координаты цели водителя. Использование уравнения (4) упрощает процесс решения и повышает устойчивость разностной схемы.

Следует отметить, что в некоторых случаях неоднородной, но не очень сложной трассы качественно верные результаты можно получить при помощи одномерной КГД модели [21, 22]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \tau \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{\rho} + P \right)}{2} + F_\rho, \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{\rho} + P \right] = f + \frac{\partial}{\partial x} \tau \frac{\partial \left(\frac{Q^3}{\rho^2} + P \frac{Q}{\rho} \right)}{2} + F_U. \quad (6)$$

В этих уравнениях, записанных в консервативной форме, транспортный поток: $Q = \rho \cdot U$. Источниковые члены в правой части F_ρ и F_U равны нулю на однородной дороге и не равны нулю, если есть въезды или съезды с основной дороги или есть изменение числа полос. Малый параметр τ интерпретируется как характерное время (интервал времени, в течение которого несколько автомобилей пересекают данную точку дороги).

Простейшей численной реализацией предлагаемых моделей является конечно-разностная реализация. Система аппроксимируется явными разностными схемами второго порядка по пространству. Отметим, что структура явного вычислительного алгоритма хорошо ложится на архитектуру многопроцессорных вычислительных систем с распределённой памятью и при необходимости выполнения большого объема вычислений может быть распараллелена с достаточно высокой эффективностью [22].

Многополосная модель на основе теории клеточных автоматов

Вторая модель, предложенная авторами ранее и являющаяся перспективной для реализации в интерактивной программе – это многополосная модель, использующая идеологию клеточных автоматов. Подробное описание этой модели изложено в работах [2, 21, 23]. Здесь опишем ее кратко.

Расчетная область представляет собой двумерную решетку. Количество ячеек поперек решетки соответствует количеству полос на рассматриваемом участке магистрали, а ширина ячейки равна ширине реальной дорожной полосы (рис. 1).

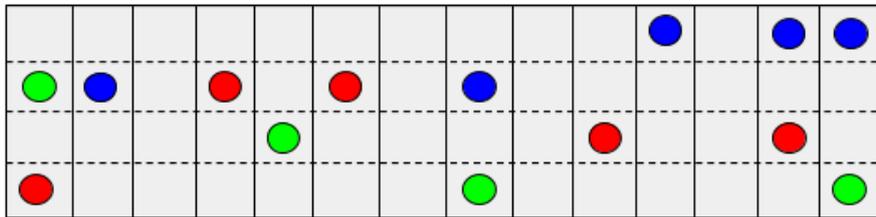


Рис. 1. Расчетная область в модели СА

Количество ячеек вдоль дороги зависит от конкретной задачи с учетом того, что продольный размер ячейки равен средней длине автомобиля плюс ширина зазора между автомобилями при максимальной плотности потока, то есть, в «пробке». В литературе приводится длина 7,5 м как стандартная величина ячейки для легковых автомобилей. Время в этих моделях тоже дискретно, система обновляется на каждом шаге по времени. При стандартных расчетах этот шаг равен 1 сек, хотя в более развитых и реалистичных моделях эта величина может меняться. В каждый момент времени ячейки решетки могут находиться в одном из двух состояний: ячейка либо занята (что соответствует присутствию в ней автомобиля), либо пуста. На рис. 1 показано состояние расчетной области в некоторый момент времени. Разный цвет элементов движения соответствует разным выбранным целям. В следующий момент времени происходит обновление состояний ячеек по определенным правилам.

На первом этапе каждый водитель проверяет, хочет ли он перестроиться в соседнюю полосу и имеет ли для этого возможность. Он перестраивается:

- если это необходимо для достижения его цели (например, подъехать к выезду с дороги) или необходимо объехать препятствие;
- если он получает преимущество после перестроения – едет с большей скоростью или с меньшей плотностью;
- если для перестроения есть возможность – перестроение разрешено и соседняя ячейка пуста.

После выбранного решения относительно перестроения и выполненного в соответствии с этим действия происходит движение вперед по выбранной полосе в соответствии с правилами однополосного движения Нагеля-Шрекенберга [24].

Следует отметить, что здесь описана первоначальная, простейшая версия стратегии перестроения. В более сложных модификациях модели [25] правила перестроения зависят от типа дорожного элемента, дорожных знаков и дорожных разметок. Учитываются также различные поведенческие характеристики водителей, различные водительские стратегии. В модель введены понятия «агрессивный», «осторожный», «вежливый» водитель. Процентные соотношения того или иного типа водителей могут меняться в процессе расчета.

Однако в текущей версии интерактивной программы реализована и визуализирована базовая модель, описанная в данном разделе.

Интерактивная программа

Как уже было отмечено, разрабатываемая программная платформа в основном предназначена для целей обучения, и её потенциальными пользователями являются студенты, поэтому вопросам взаимодействия с программой уделяется особое внимание. Известно, что при использовании интерактивных форм подачи материала повышается эффективность его усваивания. Таким образом, важным свойством программы является интерактивность, для чего необходим простой и интуитивно понятный интерфейс. Предпочтение отдается графическому интерфейсу, который делает прозрачным взаимодействие компонентов программы, помогает быстро перемещаться по приложению и наглядно управлять функционалом.

В настоящее время функционал программы состоит из следующих основных моделей и методов расчета:

1. Разностные схемы на примере уравнения переноса
 - Универсальная схема с направленными разностями
 - Метод Мак-Кормака
2. Макроскопические модели
 - Модель LWR
 - КГД модель транспортных потоков
3. Микроскопические модели
 - Модель следования за лидером Ньюэлла
 - Модель Гиппса
4. Модели клеточных автоматов
 - Модель Нагеля-Шрекенберга, обобщённая на многополосный случай

Каждый раздел включает теоретический блок и набор тестовых задач различной сложности для сравнения соответствующих моделей и методов. Пользователь должен иметь возможность менять некоторые параметры, например, количество точек расчётной сетки, константы в уравнениях,

выбирать начальные условия. Должно быть обеспечено наглядное графическое представление результатов. Дизайн программы представлен на рис. 2.

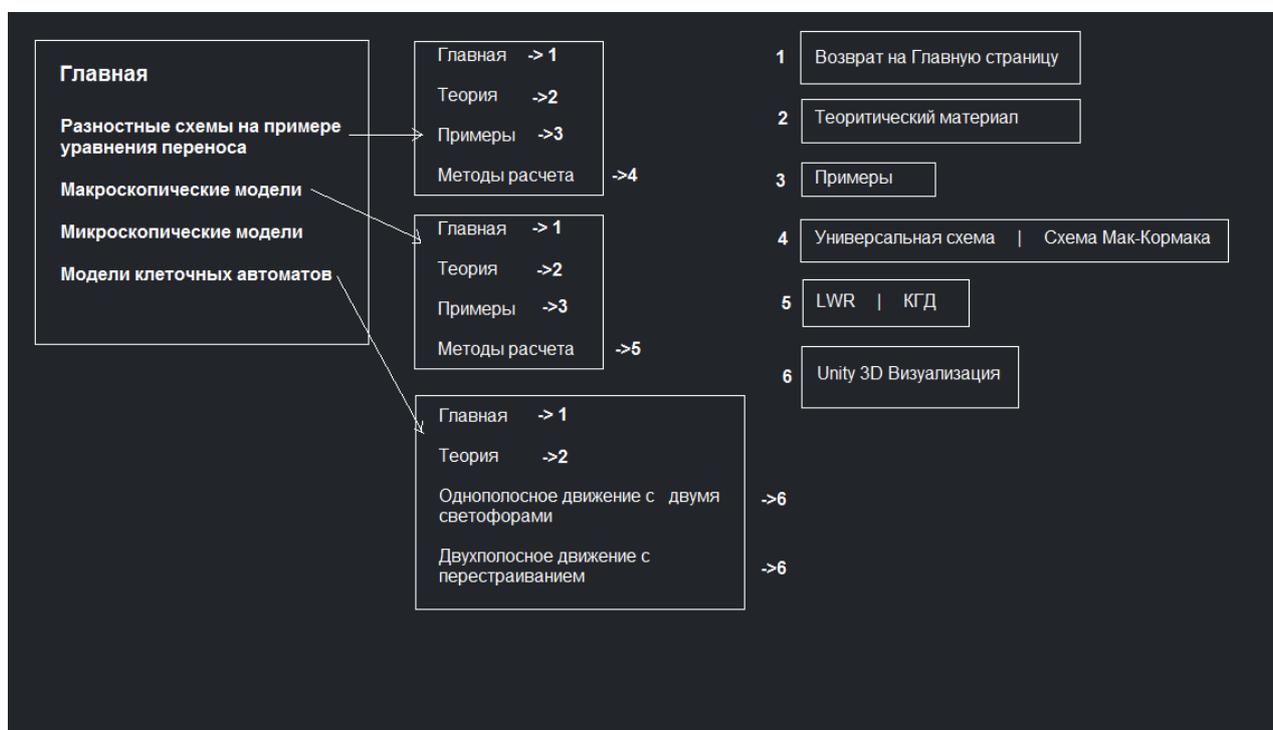


Рис. 2. Дизайн программы

К среде разработки приложения, языку программирования и средствам визуализации были сформулированы такие требования, как:

- бесплатное некоммерческое использование;
- межплатформенность;
- удобство интерфейса;
- объектно-ориентированный подход.

Этим критериям удовлетворяет Microsoft Visual Studio – программная среда для разработки приложений, как консольных, так и с графическим интерфейсом. В качестве языка программирования выбран C#. Для интеллектуального дополнения Visual Studio с целью визуализации и совместной работы с проектами WinForm используется популярный «движок» Unity [26], обладающий обширной базой бесплатных 3D моделей и предназначенный для создания приложений и игр.

Главная страница программы представлена на рис. 3. Для навигации внутри каждого раздела предусмотрено боковое меню, а сама информация по разделам располагается в пользовательских элементах управления, которые создаются отдельно.

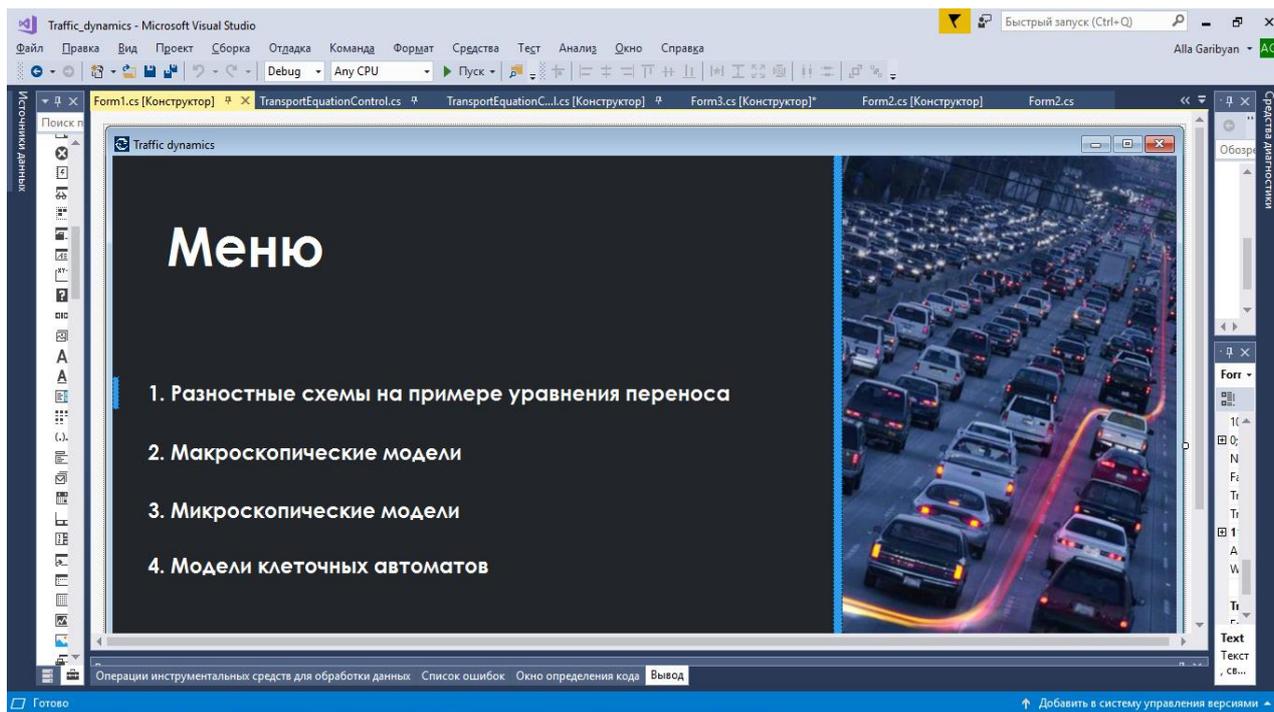


Рис. 3. Главная страница программной платформы

Для демонстрации работы программы рассмотрим раздел «Разностные схемы на примере уравнения переноса». Подраздел «Теория» содержит постановку задачи Коши для одномерного линейного уравнения переноса с постоянным коэффициентом и различные способы аппроксимации этого уравнения (см. изображение экрана на рис. 4). Подраздел «Примеры» содержит, соответственно, примеры применения разностных схем. Подраздел «Методы расчета» позволяет численно решить задачу Коши. Пользователь осуществляет выбор коэффициента в уравнении, количества точек расчётной сетки, начального условия (см. изображение экрана на рис. 5). После внесения начальных данных и нажатия на кнопку «Построить графики», происходит расчёт тестовой задачи, при этом используется аппроксимация уравнения направленными разностями, а также метод Мак-Кормака. Результаты расчётов по этим двум методам выводятся в виде графиков, которые можно сравнить и проанализировать.

В дальнейшем в разработанную оболочку предполагается добавить возможность менять коэффициент диффузии в методе Мак-Кормака, а также вручную менять шаг по времени, что позволит наглядно проиллюстрировать понятие устойчивости разностных схем, немонотонность метода Мак-Кормака.

Разностные схемы на примере уравнения переноса

Уравнение переноса как основа

Задача Коши для одномерного линейного уравнения переноса с постоянным коэффициентом:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + a \frac{\partial U}{\partial x} = 0 & -\infty < x < +\infty, \quad t > 0, \quad a = \text{const} \\ U(x, 0) = U_0(x) \end{cases}$$

Точное решение – «бегущая волна» (первоначальный профиль сохраняется):

$$U(x, t) = U_0(x - at) \quad a - \text{скорость волны}$$

Способы аппроксимации

Явная схема с левой разностью ($a > 0$) условно устойчива, первый порядок аппроксимации

$$\frac{U_i^{j+1} - U_i^j}{\Delta t} + a \frac{U_i^j - U_{i-1}^j}{\Delta x} = 0 \Rightarrow U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{a\Delta t}{\Delta x} (U_i^j - U_{i-1}^j)$$

Diagram showing grid points $(i-1, j)$ and (i, j) with an arrow pointing to $(i, j+1)$.

Рис. 4. Подраздел «Теория»

Разностные схемы на примере уравнения переноса

Решение задачи двумя методами для последующего сравнения

Введите входные параметры:

N - количество точек сетки a – константа в уравнении переноса

Задание функции U на нулевом шаге по времени:

Профиль вдоль координаты x - ступенчатая функция Профиль вдоль координаты x - синусоида

Универсальная схема с направленными разностями

График функции

Метод Мак - Кормака

График функции

Рис. 5. Подраздел «Методы расчета»

В разделе «Макроскопические модели» реализованы модель LWR с параболической фундаментальной диаграммой и одномерная КГД модель (5)-(6). Пользователю предоставляется возможность сравнить результаты расчётов задачи о временном перекрытии полосы движения из-за аварии, полученные на основе этих моделей (задача взята из книги [27]). Модель LWR реализована с помощью метода Мак-Кормака, а для КГД модели используется аппроксимация центральными разностями. В задаче можно варьировать число полос, время закрытия полосы, начальное распределение плотности, входной поток.

Визуализация модели клеточных автоматов с помощью Unity 3D

Большое значение придается разработке средств динамической интерпретации результатов. Как правило, в результате моделирования транспортных потоков получают интегральные величины, например, пропускную способность исследуемых участков улично-дорожной сети, а также информацию о потоках в виде наборов текстовых данных, что является сложным для восприятия и не позволяет наглядно проследить эволюцию потока. В то же время, при моделировании трафика бывает важно представлять результаты графически в виде пространственно-временных диаграмм, а также в виде реальной картины дороги с движущимися транспортными средствами. Это особенно важно на этапе разработки и верификации моделей и алгоритмов, а также для изучения особенностей поведения транспортных потоков и выработки мер преодоления транспортных проблем. Поэтому некоторая визуальная среда является неотъемлемой частью любого программного обеспечения для транспортного моделирования [4-6, 8, 10].

Разрабатываемая платформа позволяет визуализировать в динамике оригинальную многополосную модель клеточных автоматов, представленную выше. Визуализация осуществляется в среде Unity, которая интегрируется с Visual Studio. В Unity генерируются транспортные средства, а также добавляются различные объекты городской инфраструктуры (см. рис. 6).

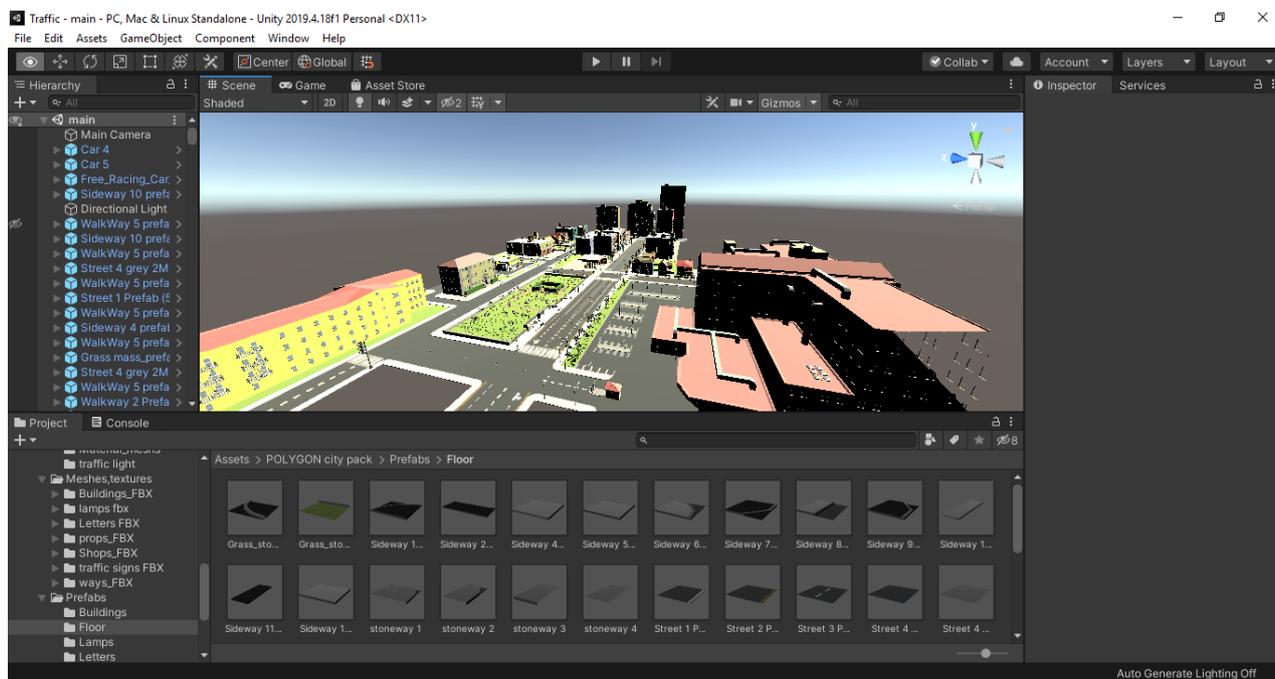


Рис. 6. Пример модели города в Unity

Первостепенная задача — обеспечить связь кода с визуальными компонентами. На данном этапе трудно разделить математическую часть и

визуальную, без генерации транспортных средств в Unity невозможно работать над алгоритмом.

Разработка программы основана на парадигме объектно-ориентированного программирования. Взаимодействие объектов происходит через скрипты, прикрепленные к объектам на сцене. Объекты являются экземплярами классов Cell (клетка), Machine (машина), ModelParameters (параметры), ElementOfChance (случайная величина), Road (дорога). Их объединяет класс RoadController, который содержит методы для реализации перестроения автомобилей. Именно этот класс взаимодействует с графическим движком. Классы машина, клетка, дорога, параметры абстрагированы от среды Unity, поэтому могут быть применены в любых других проектах.

Модель клеточных автоматов в Unity была протестирована на двух задачах: однополосное движение со светофорами и двухполосное движение с перестроением автомобилей. В обоих случаях реализовано двустороннее движение автотранспорта. Примеры визуализации показаны, соответственно, на рисунках 7 и 8.



Рис. 7. Визуализация движения по трассе со светофором

Рассматривались ограниченные участки дороги: в первой задаче – 265 м, во второй – 580 м. Реализована возможность регулировать входной поток на участке дороги – генерация транспортных средств происходит по параметрам, заданным в панели “Настройки”. В первой задаче автомобили переходят в торможение и затем полностью останавливаются перед красным сигналом светофора. Во второй задаче автомобили двигаются в соответствии с расширенной на многополосный случай моделью Нагеля-Шрекенберга.



Рис. 8. Визуализация движения с перестроением

Анализ динамики автотранспорта, полученной на основе модели клеточных автоматов и визуализированной с помощью разработанных средств, позволяет сделать вывод об адекватности моделирования и приемлемом качестве отображения результатов: воспроизводится плавное движение автомобилей по дорогам, правильная реакция на сигналы светофора, разумное перестроение.

Заключение

В препринте представлено новое программное обеспечение для математического моделирования движения автомобильного транспорта, объединяющее широкий спектр подходов: макро- и микроскопические модели, а также модели клеточных автоматов. В программе реализованы как классические модели и методы, так и оригинальные наработки авторов препринта, неоднократно апробированные и имеющие преимущества перед разработками других авторов. Характерными особенностями предлагаемой платформы являются интерактивность, модульная структура, наглядное динамическое представление результатов. Программное обеспечение имеет большой потенциал для дальнейшего развития за счет включения модулей, реализующих новые модели и задачи. Платформа в основном предназначена для целей обучения, её потенциальными пользователями являются студенты. В дальнейшем платформа может быть преобразована в СКЛ, обеспечивающую доступ к информационным ресурсам через Интернет.

Библиографический список

1. Сухинова А.Б., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г. Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // Математическое моделирование, 2009, Т. 21, № 2, С. 118–126.
2. Трапезникова М.А., Фурманов И.Р., Чурбанова Н.Г., Липп Р. Моделирование многополосного движения автотранспорта на основе теории клеточных автоматов // Математическое моделирование, 2011, Т. 23, №6, С. 133–146.
3. Fundamentals of Traffic Simulation. In: International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 145, J. Barcelo (Ed.), Springer, 2010, 452 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-6142-6
4. PTV Vision Traffic Suite [Электронный ресурс]. URL: <https://ptv-vision.ru/> (дата обращения: 12.04.2022).
5. Aimsun: Simulation and AI for future mobility [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aimsun.com/> (дата обращения: 12.04.2022).
6. MATSim: Multi-Agent Transport Simulation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.matsim.org/> (дата обращения: 12.04.2022).
7. Horni, A.; Nagel, K.; Axhausen, K.W. (Eds.) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. London: Ubiquity Press, 2016.
8. SUMO: Simulation of Urban MObility [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eclipse.org/sumo/> (дата обращения: 12.04.2022).
9. Lopez P.A. et al. Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: *21st Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, 2575–2582. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569938
10. Bentley Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bentley.com> (дата обращения: 12.04.2022).
11. E-learning: модный тренд или образование будущего? [Электронный ресурс] URL: <https://sike.ru/e-learning-modnyj-trend-ili-obrazovanie-budushchego> (дата обращения: 12.04.2022).
12. Воробьева Т.А. К вопросу о понятии электронного обучения // *Идеи и идеалы*, 2014, Т. 2, № 1(19), С. 143-152.
13. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Среда электронного обучения [Электронный ресурс]. URL: <http://lms.tpu.ru> (дата обращения: 12.04.2022).
14. Professional Group. Свежие решения в области IT. Виртуальные лабораторные работы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.professionalgroup.ru/virtualnyie-laboratornyie-raboty.html> (дата обращения: 12.04.2022).
15. Герман М.С., Ермаков А.В., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Интернет-сайт как инструмент для создания и развития научно-образовательных ресурсов // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша*. 2011. № 8. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-8>

16. Васильев А.Н, Осипов В.П, Сивакова Т.В. Сетевая компьютерная лаборатория (СКЛ) как распределенная научно-образовательная среда прикладного моделирования // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2013, Т. 9, № 4, С. 100–112.
17. Курганская Г.С. Дифференцированная система обучения через Интернет. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та, 2000. – 103 с.
18. ГЕКАДЕМ: Дистанционно-образовательная система [Электронный ресурс]. URL: <https://hecadem.irk.ru/> (дата обращения: 12.04.2022).
19. Четверушкин Б.Н. Кинетические схемы и квазигазодинамическая система уравнений. Москва: МАКС Пресс, 2004. – 332 с.
20. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Поляков Д.Б. Математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микроскопических подходов // *Вестник АГТУ, Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика*, 2014, №1, С. 130–139.
21. Churbanova, N.G.; Chechina, A.A.; Trapeznikova, M.A.; Sokolov, P.A. Simulation of traffic flows on road segments using cellular automata theory and quasigasdynamic approach. *Mathematica Montisnigri*, 2019, XLVI, 72–90.
22. Соколов П.А., Школина И.В., Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование на суперкомпьютерах движения автотранспорта на основе КГД системы уравнений // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2019, №7, С. 159–169. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-7-159-169
23. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Двумерная модель клеточных автоматов для описания динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети // *Математическое моделирование*, 2017, Т. 29, №9, С. 110–120.
24. Nagel, K.; Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France*, 1992, 2221–2229.
25. Chechina, A.; Churbanova, N.; Trapeznikova, M. Driver behaviour algorithms for the cellular automata-based mathematical model of traffic flows. EPJ Web of Conferences, 2021, **248**, 02002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802002>
26. Unity Real-Time Development Platform [Электронный ресурс]. URL: <https://unity.com/> (дата обращения: 12.04.2022).
27. Treiber, M.; Kesting, A. Traffic flow dynamics. Data, models and simulation. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013, 503 p.

Оглавление

Введение	3
Краткое описание состояния в области исследований.....	3
Макро- и микроскопические модели в основе разрабатываемой программы.....	6
Квазигазодинамическая модель транспортных потоков.....	6
Многополосная модель на основе теории клеточных автоматов	9
Интерактивная программа.....	10
Визуализация модели клеточных автоматов с помощью Unity 3D	14
Заключение.....	16
Библиографический список.....	17