

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В. П. АСТАФЬЕВА»
(КГПУ им. В. П. Астафьева)

Институт математики, физики и информатики
Кафедра физики, технологии и методики обучения

Лапина Дарья Андреевна

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Концепция и моделирование логистики 3D-транспорта будущего: интеграция
в спецкурс для школьников

Направление подготовки 44.03.01 Педагогическое образование
Направленность (профиль) образовательной программы Физика

ДОПУСКАЮ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
доцент, кандидат педагогических наук
С.В. Латынцев

06.06.2025

(дата, подпись)



Руководитель
кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры
ФТиМО КГПУ

И.Н. Орлова

16.05.2025

(дата, подпись)

Обучающийся

Д.А. Лапина

07.06.2025

(дата, подпись)

Дата защиты 22.06.2025

Оценка отлично

(прописью)

Красноярск 2025

Содержание

Введение	3
Глава I. Теоретические основы моделирования двумерного транспортного потока. Связь закономерностей 2D и 3D потоков	6
§ 1.1 Понятие и особенности двумерного транспортного потока	6
§ 1.2 Основные закономерности двумерного транспортного потока	10
1.2.1 Фундаментальные зависимости двумерного транспортного потока	10
1.2.2 Фазовые переходы в двумерном транспортном потоке	11
§ 1.3 Сравнение закономерностей 2D- и 3D-транспортного потока	12
Глава II. Принципы построения алгоритмов для моделирования 3D-транспортного потока	15
§ 2.1 Постановка задачи моделирования 3D-транспортного потока	15
2.1.1 Проблематика	16
2.1.2 Классификация моделей	17
§ 2.2 Основные концепции и параметры 3D-транспортного среды	18
2.2.1 Пространственная и временная структура среды	18
2.2.2 Модели плотности и интенсивности воздушного потока. Классификация зон в воздушной среде	19
§ 2.3 Математические модели и методы описания 3D-транспортного потока	20
Глава III. Оригинальные результаты: разработка приложения	23
Проблема № 1: Гидродинамика воздушных перелетов	26
Проблема № 2: загруженность транспортной сети – задача теории массового обслуживания	29
Модель	30
Проблема (ключевой вопрос)	30
Глава IV Разработка методических материалов для проведения занятий со школьниками в рамках обсуждаемой тематики	39
§ 4.1 Практическая значимость 3D-транспортных потоков для будущего поколения	39
§ 4.2 Методические особенности изучения трёхмерного транспортного потока в школе	42
4.2.1 Методологические подходы	42
4.2.2 Образовательные инструменты и технологии. Формирование компетенций	43
4.2.3 Препятствия и пути их преодоления	44
4.2.4 Программа спецкурса	44
4.2.5 Методические рекомендации	51
Заключение	56
Список используемых источников	58

Введение

Современные транспортные системы всё чаще сталкиваются с вызовами, связанными с увеличением числа участников дорожного движения, усложнением инфраструктуры, и поиском инновационных решений для организации эффективного перемещения людей и грузов. Одним из перспективных направлений в этой области является развитие систем аэротакси и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые способны существенно изменить парадигму городской мобильности. Однако массовое внедрение таких технологий требует решения сложных задач, связанных с моделированием и управлением воздушными потоками в условиях ограниченного городского пространства.

Стремительное развитие рынка аэротакси и коммерческих БПЛА создаёт потребность в разработке надёжных методов моделирования их потоков. В отличие от традиционного наземного транспорта средства функционируют в условиях трёхмерного пространства, что значительно усложняет задачу управления их движением и предотвращения коллизий (столкновений друг с другом, с наземными объектами или препятствиями). Особую сложность представляет моделирование потоков в условиях высокой плотности, когда необходимо учитывать множество факторов: аэродинамические взаимодействия, ограничения воздушного пространства, погодные условия и требования безопасности.

В настоящее время для моделирования 3D-транспортных потоков применяются различные подходы включая:

- Агентное моделирование, где каждый летательный аппарат рассматривается как автономный объект, следующий определённым алгоритмам поведения;
- Методы, основанные на теории динамических систем и дифференциальных уравнений, позволяющие описывать движение аппаратов в непрерывном пространстве;

- Дискретные модели, использующие клеточные автоматы или сеточные методы для оптимизации воздушных коридоров.

Несмотря на существующие разработки, многие аспекты моделирования воздушных потоков остаются недостаточно изученными. В частности, требуют дальнейшего исследования вопросы оптимального распределения воздушного пространства, минимизации энергопотребления и обеспечения устойчивости работы системы при высокой нагрузке.

Актуальность данной темы исследования заключается в том, что закономерности 3D-транспортного потока являются малоизученными и находятся в стадии исследования и разработки. На данный момент, системе общего образования эта тематика является приоритетной, в связи с чем проводится множество технологических школ и семинаров.

Объектом данного исследования являются модели транспортных потоков.

Предметом исследования – закономерности функционирования 2D- и 3D-транспортных потоков, возможности их интеграции в спецкурс для школьников.

Цель работы представляет собой выявление путём моделирования системы закономерностей для замкнутого 3D-транспортного потока (по аналогии с известными закономерностями 2D-потока), а также разработку методических материалов для проведения соответствующих образовательных материалов.

Гипотеза исследования: набор закономерностей 3D-транспортного потока отличен от аналогичного набора для 2D-потока.

Задачи, которые были поставлены в работе:

1. Установит перечень закономерностей для 2D-транспортного потока.
2. Разработать приложение для моделирования 3D-транспортного потока.
3. На основе разработанного приложения установить перечень закономерностей для 3D-транспортного потока, указать отличия от 2D-потока.

4. Проанализировать и выделить в данной проблематике компоненты, соответствующие школьной программе, а также выяснить для чего закономерности 3D-потока нужны молодому поколению.
5. Разработать методические материалы для проведения занятий (проектных работ, дополнительных курсов) в школе, в рамках данной темы.

Структура выпускной квалификационной работы включает в себя введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложение.

В первой главе рассматриваются теоретические основы моделирования двумерного транспортного потока, а также связь закономерностей 2D- и 3D-транспортных потоков.

Вторая глава содержит описание принципов построения алгоритма для моделирования 3D-транспортного потока.

Третья глава является оригинальной частью научно-исследовательской работы, в которой анализируется разработанное приложение для 3D-транспортного потока, и на основе полученного анализа составляется перечень закономерностей для трёхмерной системы.

В четвёртой главе раскрывается методическая значимость исследования для проведения занятий со школьниками.

В заключении подводятся итоги и формулируются окончательные выводы, сделанные в ходе исследования.

Библиография содержит список использованных источников.

В приложении приводится текст программы для моделирования трёхмерной транспортной системы.

Глава I. Теоретические основы моделирования двумерного транспортного потока. Связь закономерностей 2D и 3D потоков

§ 1.1 Понятие и особенности двумерного транспортного потока

Двумерный транспортный поток – модель движения транспортных средств, учитывающая их перемещение не только вдоль оси (например, по полосе дороги), но и в поперечном направлении (объезды препятствий, перестроения и т.д.). В отличие от одномерного потока, где транспорт рассматривается как линейная последовательность, двумерный поток позволяет анализировать более сложные нелинейные сценарии:

- Движение по многополосным дорогам;
- Перестроения и обгоны;
- Взаимодействия потоков на перекрёстках и развязках [12].

В условиях плотной и многополосной городской застройки, развитие транспортных систем требует верных математических моделей, способных точно описывать движение транспортных средств. В отличие от одномерных моделей, которые ориентированы на потоки вдоль одной полосы движения, двумерные (2D) модели позволяют учитывать как продольные, так и поперечные потоки. Данные факторы важно учитывать при анализе перекрёстков, кольцевых развязок, где пространственное распределение транспортных средств играет ключевую роль.

Важно отметить особенности двумерного транспортного потока, такие как:

1. Пространственная динамика
 - a. В 2D-потоке учитывается не только продольная скорость, но и поперечные перемещения;
 - b. Моделирование требует двумерных координат (например, в клеточных автоматах или микроскопических моделях).
2. Сложность взаимодействий
 - a. Водители в 2D-транспортном потоке реагируют как на впереди идущий автомобиль, так и на соседние транспортные средства, подчиняясь правилам дорожного движения;
 - b. Возникают такие эффекты как «пробки волной», «эффект бабочки» при пересечениях.

Рассмотрим эффект «пробки волной». Это явление, при котором затор в движении транспорта распространяется назад по потоку в виде волны. Происходит это даже если первоначальная причина пробки устранена. В такой ситуации водители вынуждены резко тормозить и снова разгоняться, создавая колебания скорости, которые передаются следующим автомобилям. Первоначальное возмущение возникает при торможении одного автомобиля (например, из-за перестроения, препятствия или просто «лихача»), сужение дороги (при ремонте или ДТП), а также при неравномерном движении на светофорах или зонах с ограниченной видимостью. И даже после устранения причины (например, машина, которая создавала помеху, уже уехала), волна продолжает распространяться, так как водители по инерции поддерживают цикл «торможение-разгон». Данное явление важно учитывать, так как возникают фантомные пробки без видимой причины, просто из-за поведения водителей, которые становятся причиной снижения пропускной способности. Волны заставляют машины двигаться рывками, уменьшая тем самым среднюю скорость потока.

3. Плотность и интенсивность в двумерном пространстве

- a. В отличие от одномерного потока, плотность двумерного может варьироваться по полосам, что влияет на общую пропускную способность;
- b. Возможны локальные скопления (заторы) в одной полосе при свободном движении других [14].

4. Моделирование двумерного транспортного потока

Для анализа и прогнозирования поведения транспортных средств в двумерном пространстве применяются различные математические и компьютерные модели. В зависимости от уровня детализации их можно разделить на:

- a. Макроскопические модели;
- b. Микроскопические;
- c. Мезоскопические.

5. Влияние человеческого фактора

Двумерный транспортный поток сильно зависит от поведения водителей, что вносит стохастичность в систему:

- a. Реакция на соседние автомобили: водители могут резко тормозить и ускоряться из-за автомобилей [3];
- b. Агрессивное и пассивное вождение: влияет на частоту обгонов и образование заторов;
- c. Ошибки восприятия: например, недооценка скорости соседнего автомобиля при перестроении.

Рассмотри и сравним три математических модели транспортного потока:

- Модель следования за лидером (MOBIL – Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes). Разработчики модели: Kesting, Treider, Helbing (2007) [16];
- Клеточный автомат Нагеля-Шрекенберга (2D CA), Разработчики модели: Nagel, Schreckenberg (1992) [15];
- Гидродинамическая модель Пейна-Уизема. Разработчики: Payne (1971), Whitham (1974).

MOBIL расширяет интеллектуальную модель водителя (IDM) для двумерных потоков. Модель включает функцию перестроения, в симуляции водитель перестраивается, основываясь на двух критериях: личная выгода (уменьшение времени пути), безопасность (не вызывает резкого торможения у других автомобилей). Подходит для моделирования обгонов и перестроений на многополосных дорогах [7].

Клеточный автомат Нагеля-Шрекенберга основывается на принципе разбиения на клетки, каждая машина занимает одну клетку. Перестроение происходит если соседняя полоса свободнее. 2D CA позволяет решать различные транспортные проблемы, исследовать зависимость пропускной способности в зависимости от режимов работы светофора, зависимость от поведения водителей и т.д. [8]

Гидродинамическая модель Пэйна-Узема описывает транспортный поток как сплошную среду (аналогично жидкости) в двумерном пространстве, где машины – это «частицы», а дорога – «русло реки». Ключевые принципы:

- Чем больше машин (выше плотность), тем медленнее они едут;
- Поддержание комфортной скорости;
- Реализация волны пробок;
- Перестроение.

Таблица 1.1 Сравнительная таблица математических моделей двумерного транспортного потока.

Модель	Уровень детализации	Плюсы	Минусы
MOBIL	Микро	Учёт человеческого фактора	Сложность калибровки
2D CA	Микро	Высокая скорость расчётов	Дискретность пространства
Пейна-Узема	Макро	Подходит для больших систем	Не учитывает индивидуальные поведения

Таким образом для моделирования перестроений и локальных взаимодействий оптимальна MOBIL, для массовых симуляций – 2D CA, а для стратегического планирования – модель Пэйна-Узема.

§ 1.2 Основные закономерности двумерного транспортного потока

Современные транспортные системы характеризуются высокой сложностью организации движения, особенно на многополостных автомагистралях, на которых как раз и проявляются специфические закономерности 2D-транспортных потоков, где маневрирование автомобилей происходит свободно в двух измерениях.

Моделирование такого потока требует учёта множества факторов, влияющих на плотность, скорость и интенсивность движения.

1.2.1 Фундаментальные зависимости двумерного транспортного потока

Основу теоретического описания любого транспортного потока составляет триада взаимосвязанных параметров: плотность, скорость, интенсивность. Эти зависимости играют ключевую роль в анализе, моделировании и управлении дорожным движением особенно в условиях городской среды, где движение чаще всего имеет двумерный характер.

В классической одномерной модели основными величинами являются:

- Плотность потока ρ , авт./км;
- Интенсивность потока N авт/ч;
- Средняя скорость потока v , км/ч.

Связь между параметрами выражается уравнением:

$$N = v\rho \quad (1.1)$$

Данная зависимость не изменяется и применяется и для двумерной модели, однако необходимо учитывать, что в двумерном движении существует не только продольное, но и поперечное движение. Средняя скорость будет иметь вид вектором строящимся по двум координатам v_x, v_y , а поток – как векторная величина:

$$N = \vec{v} \vec{\rho} \quad (1.2)$$

Не малую важность имеет и прогнозирование изменения плотности транспортного потока в пространстве и времени, что позволяет рассчитать, например накопления автомобилей перед светофором, моделирование распространения пробки на магистрали и анализа загрузки транспортной сети в час пик. Для этого используют уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} + \nabla * (\rho(x, y, t) * \vec{v}(x, y, t)) = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.4)$$

где ρ – плотность транспортных средств в любой момент времени, ∇ – оператор дивергенции (расхождения потока).

Исходя из уравнения видно, что изменение плотности по времени связано с расходимостью потока (если поток расходится – плотность уменьшается, если поток сходится - растёт) [6].

Как показывает уравнение непрерывности, динамика транспортного потока напрямую зависит от скорости движения. Однако сама скорость не является независимой величиной – она закономерно снижается при увеличении плотности потока. Эту зависимость можно выразить исходя из модели скоростей – линейной модели Гриншлуда:

$$v = v_0 \left(1 - \left[\frac{\rho}{\rho_{max}} \right]^{(n+1)/2} \right) \quad (1.5)$$

При $n=1$ получаем частный случай:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right) \quad (1.6)$$

Данная модель позволяет прогнозировать скорость движения (определить среднюю скорость на участке потока, рассчитать время прохождения маршрута и т.д.), оценить пропускную способность и оценить критические режимы потока (плотность начала образования пробок, условия перехода в «синхронизированный режим»).

1.2.2 Фазовые переходы в двумерном транспортном потоке

Фазовые переходы в транспортных потоках представляют собой изменения состояния системы, аналогичные фазовым переходам вещества в физике, например переход вещества из твёрдого состояния в жидкое. В контексте транспортных потоков это означает переход из свободного движения к состоянию пробки. Такие фазовые переходы возникают, в случае качественных изменений характеристик потока. Для двумерных транспортных систем, характерных для городских дорожных сетей, данные процессы обладают рядом особенностей.

Согласно исследованиям, выделяют три основных фазы транспортного потока:

- Фаза свободного движения (*Free Flow*), которая характеризуется:
 - Линейной зависимостью скорости от плотности;
 - Отсутствием корреляции между скоростями отдельных транспортных средств [1].

- Фаза синхронизированного потока (*Synchronized Flow*):
 - Нелинейные зависимости макроскопических характеристик;
 - Появление пространственно-временных корреляций;
 - Формирование классических структур [9].
- Фаза широкого движущегося кластера, затора (*Congested Flow или «stop & go»*):
 - Явно выраженные волны;
 - Процессы распространения возмущений;
 - Гистерезисные явления между фазами [2].

В двумерных транспортных потоках, в отличие от одномерных наблюдаются дополнительные эффекты. Один из них - анизотропия, обусловленная различными предельными скоростями в ортогональных направлениях, неоднородностью дорожной сети и наличием точек конфликта транспортных потоков. Также сюда входят нелокальные взаимодействия, проявляющиеся в перекрёстной корреляции потоков, распространении возмущений в поперечном направлении и эффекте памяти при изменении направления движения. Для более наглядных моделей сюда также включают и граничные эффекты – влияние краевых условий (бордюры, разметка, препятствия). Таким образом все эти аспекты делают моделирование двумерного транспортного намного сложнее.

§ 1.3 Сравнение закономерностей 2D- и 3D-транспортного потока

Современное моделирование транспортных систем требует выбора между различными подходами, каждый из которых обладает своими уникальными возможностями и ограничениями. Традиционные двумерные модели, описывающие движение транспортных средств по дорожной сети, сталкиваются с принципиальными ограничениями при анализе движения транспорта в воздушном пространстве. Ключевое различие между подходами заключается в степени свободы движения.

Двумерные модели учитывают только продольное и поперечное перемещение транспорта, принципиально изменяют привычные динамические

закономерности при попытке их экстраполяции на трёхмерные системы. Что и вносит значительные коррективы в знакомые нам до этого закономерности, при применении их на трехмерные модели [5].

Сравним основные закономерности двух моделей учитывая, что под трёхмерным транспортным потоком учитывается БПЛА. В Таблице 1.2 представлены результаты сравнения.

Таблица 1.2 Сравнительная таблица закономерностей моделей двумерного и трехмерного транспортных потоков.

Критерии	2D-поток	3D-поток
Геометрия движения	Плоскость (x, y)	Объём (x, y, z)
Ограничения	Дорожная сеть, разметки, светофоры	Воздушные коридоры, зоны ограничений
Критические явления	Пробки, волны, торможения	Турбулентные следы, конфликты траекторий
Распределение скоростей	Однородное в пределах полосы движения	Неоднородное по всем трём координатам

Данное сравнение демонстрирует принципиальные различия закономерностей для двух систем. Однако основная триада параметров (плотность, скорость, интенсивность) и их созависимость остаётся прежней, но их изменения будут по-разному влиять на моделирование в этих двух системах, ключевые изменения вносят именно оси координат. Сравним зависимость скорости, плотности и интенсивности потока для этих двух моделей:

Таблица 1.3 Сравнительная таблица основных характеристик (ρ , N , v) моделей двумерного и трехмерного транспортных потоков.

Характеристика	2D-поток	3D-поток
Связь скорости и плотности	$v = v_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right)$ (линейная модель)	$v = v_{max} * e^{\frac{-\rho}{\rho_{crit}}}$ (экспоненциальная модель)

Интенсивность потока	$N = \vec{v} \vec{\rho}$ (максимум при средней плотности)	$N = \vec{v} \vec{\rho}$ (учитывая три вектора)
Свободный поток	Низкая плотность	Низкая плотность
Синхронизированный поток	Средняя плотность	Средняя плотность
Пробка	Высокая плотность	Высокая плотность

Исходя из Таблицы 1.2 можно сделать вывод по ключевым отличиям, скорость в 2D потоке линейно зависит от плотности, а в 3D скорость снижается плавно. Данный факт говорит о том, что мы можем таким образом получить резкие фазовые переходы в двумерной системе и мягкие переходы в трёхмерной. Основная схожесть двух систем заключается в условиях перехода от одной фазы к другой, для обеих систем требуются одни и те же условия, однако протекать они будут по-разному. Но не стоит также забывать, что для планирования воздушных коридоров необходимо учитывать и турбулентность, а в идеале – погодные условия, которые также сильно влияют на поведения транспорта в воздухе.

Глава II. Принципы построения алгоритмов для моделирования 3D-транспортного потока

Моделирование трехмерных транспортных потоков, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и перспективные системы городской авиамобильности, представляют собой сложную и актуальную задачу. В отличие от традиционных двумерных моделей дорожного трафика, 3D-моделирование требует учёта дополнительных измерений, сложных физических взаимодействий и динамических граничных условий.

В последние годы наблюдается стремительное развитие технологий БПЛА, аэротакси и других форм малой авиации, ориентированной на использование именно в городских и пригородных условиях. Становится всё более очевидной необходимость в формировании новой парадигмы управления транспортом – трёхмерного воздушного движения. В отличие от традиционного транспорта, который ограничен дорогами и горизонтальной плоскостью, воздушный перемещается в полноценном трёхмерном пространстве, что требует качественно нового подхода к моделированию, прогнозированию и управлению такими потоками.

Воздушный трафик отличается не только высокой степенью свободы, но и увеличенной сложностью в обеспечении безопасности, предотвращении конфликтов траекторий, оптимизации маршрутов и соблюдении ограничений воздушного пространства.

§ 2.1 Постановка задачи моделирования 3D-транспортного потока

Моделирование транспортного потока – это важная задача, лежащая в основе анализа и управления дорожным движением. В зависимости от уровня детализации модели меняется её применение. Однако большинство этих моделей исторически развивались в рамках двумерного пространства. Таким образом переход в трёхмерное пространство ставит перед исследователями целый ряд новых задач: расширение модели пространства, переработка моделей движения, учёт дополнительных факторов влияния и разработка алгоритмической базы.

Моделирование 3D-транспортного потока становится всё более актуальным в условиях интенсивной урбанизации, особенно в мегаполисах с развитой вертикальной структурой.

Использование БПЛА и аэротакси в таких сферах, как доставка, транспортировка людей требует многих ресурсов. Одной из основных задач становится прогнозирование и управление воздушным тарифом, особенно в условиях массового использования. Появляется необходимость:

- Моделировать одновременно движение сотен и тысяч БПЛА в ограниченных городских районах;
- Учитывать вертикальные эшелоны, динамически изменяющиеся маршруты, зоны ограничения полётов;
- Предотвращать столкновения в условиях высокого уровня автоматизации [4].

Реализация этих пунктов не возможна без построения математических программ и моделей, которые бы адекватно отражали поведение воздушных агентов в трёхмерном пространстве.

2.1.1 Проблематика

Моделирование воздушного 3D-транспортного потока сопряжено со следующими основными трудностями:

1. Полноценное 3D-пространство, которое включает не только координаты (x , y , z), но и углы ориентации, вертикальную скорость и габариты воздушного судна [11].

2. Динамичность среды и неопределённость

Как упоминалось ранее, воздушная среда подвержена влиянию погодных условий: ветра, осадков, турбулентности, а значит необходимо учитывать не только текущую, но и прогнозируемую погоду при планировании и построении траектории.

3. Зоны ограничения и эшелонирования

Городская воздушная инфраструктура включает в себя зоны запрета (вокруг аэропортов, над зданиями, линиями электропередач) коридоры

движения, эшелоны, а также зоны взлёта и посадки. Всё это должно включаться в идеальную модель [17].

4. Конфликты и безопасность

При большом числе участников воздушного движения возникает риск конфликта траекторий. Алгоритмы моделирования должны включать средства обнаружения и решения конфликтов, включая системы «sense-and-avoid».

5. Масштабируемости и производительность

При моделировании большого числа воздушных единиц требуется оптимизация алгоритмов для обеспечения расчётов в реальном времени или близко к нему [20].

2.1.2 Классификация моделей

Модели воздушного трафика можно классифицировать следующим образом:

1. Агентные модели (микроскопический подход)

Каждое воздушное средство моделируется как независимый агент, обладающий логикой поведения: следование маршруту, уклонение, реакция на сигналы, взаимодействие с другими агентами [18].

2. Полевые модели (макроскопический подход)

Воздушный поток рассматривается как непрерывная среда. Используются поля плотности, скорости, применяются методы из аэродинамики и физики сплошных сред [22].

3. Гибридные модели

Исходя из названия комбинируют микро- и макроподходы. Используются, например, для симуляции массовых маршрутов (макро), но с детальной проработкой манёвров (микро) [24].

4. Сетевые графовые модели

Используют заранее заданную сеть «воздушных коридоров» и узлов. Воздушные единицы перемещаются по заранее построенным маршрутам, аналогично наземным дорогам [23].

Построение моделей и алгоритмов для трехмерного транспортного потока – это ключевая задача на пересечении аэродинамики, робототехники, урбанистики и компьютерных наук. Она требует комплексного подхода, который будет в себя включать не только теоретическую проработку, но и инженерную реализацию. Успешное решение этих задач обеспечит безопасную и эффективную интеграцию воздушного транспорта в городское воздушное пространство ближайшего будущего.

§ 2.2 Основные концепции и параметры 3D-транспортной среды

Воздушная транспортная среда, отличаясь от наземной, как уже упоминалось ранее, обладает тремя степенями свободы, а также включает в себя угловые повороты, крен, тангаж и рысканье. Для БПЛА и аэротакси, особенно эксплуатируемых в условиях городской среды, к этому добавляются:

- Ограничения по высоте;
- Требования к точности позиционирования;
- Динамические зоны ограничений (например, временно закрытые воздушные коридоры);
- Метеоусловия;
- No-Fly Zones (NFZ) [19].

Таким образом, моделирование требует учёта геометрических, физических, временных и нормативных факторов.

2.2.1 Пространственная и временная структура среды

Модели воздушной среды строятся на основе одного из следующих подходов:

1. Вексельная модель (Voxel-Based)

Пространство разбивается на трёхмерную сетку (аналогично пикселям, но в объёме). Каждый воксель может хранить информацию о: занятости, допустимости полёта, типе зоны и плотности трафика. Это упрощает проверку на столкновение и посторонние траектории с учётом ограничений [26].

2. Графовая модель с эшелонами

Пространство представляется в виде сети воздушных коридоров и узлов, которые соединены эшелонами. Такой подход близок к моделированию воздушных дорог, что значительно упрощает алгоритм, но с потерей степени свободы [21].

3. Континуальная модель

Описывает среду как непрерывное поле в пространстве. Используется, например, при применении методов физики сплошных сред или гидродинамики, что позволяет моделировать макроскопическое поведение воздушного трафика [13].

Кроме пространственной, необходимо учитывать и временную дискретизацию:

- **Сценарии в реальном времени** – для имитации поведения на коротких интервалах [10];
- **Сценарий планирования** – траектории рассчитываются вперёд с учётом всех параметров (прогноза трафика, ограничений и т.д.).

2.2.2 Модели плотности и интенсивности воздушного потока. Классификация зон в воздушной среде

Аналогично классическим моделям транспортного потока, в воздушной среде можно ввести понятия:

- **Плотность трафика или же потока $\rho(x, y, z, t)$** – количество воздушных единиц в единичном объёме пространства в данный момент времени [25].
- **Интенсивность потока $q(x, y, z, t)$** – вектор, отражающий количество единиц, проходящих через заданную поверхность за единицу времени.

Логично и для удобства моделирования всё пространство можно разделить на несколько типов зон:

1. Зоны свободного полёта (Free Flight Zones)
Участки, где БПЛА имеют максимальную степень свободы и минимальные ограничения.
2. Координируемые коридоры (Managed Air Corridors)

Направленные воздушные дороги с регулируемым движением, аналог дорог с односторонним движением.

3. Зоны конфликта (Conflict Zones)

Область с высокой вероятностью пересечения траекторий. Требуют усиленного контроля и активного управления.

4. Зоны посадки и старта (Vertiports)

Наземные или крышные точки обслуживания, где происходит вертикальные взлёты или посадки.

5. Запретные зоны (No-Fly Zones)

Постоянные или временные зоны, над которыми полёт запрещён.

Эти зоны необходимо отображать в модели, задавая им веса (для определения приоритета) и коэффициенты риска для маршрутизации и предотвращения конфликтов.

Корректное построение 3D-воздушной среды – необходимый этап перед разработкой алгоритмов планирования, избегания столкновений и оптимизации маршрутов. Среда должна быть «гибкой», масштабируемой, а также учитывать разного рода ограничения. Только при наличии достоверной пространственно-временной модели возможно адекватно прогнозировать поведение воздушного трафика в условиях роста нагрузки и плотности.

§ 2.3 Математические модели и методы описания 3D-транспортного потока

Моделирование воздушного трафика в трёхмерном пространстве требует учёта множества факторов: динамики движения аппаратов, физических ограничений, взаимодействий между участниками, требований безопасности, плотность потока, погодные условия и конечно особенности городской инфраструктуры. Поэтому чаще всего используются многоуровневые модели, включающие как микроскопические, так и макроскопические метода, а также гибридные подходы.

Микроскопические модели как упоминалось ранее описывают поведение отдельных агентов (БПЛА, аэротакси). Каждый агент обладает собственным

состоянием и стратегией движения. Основные принципы такой модели заключаются в том, что:

Модель уравнения движения агента:

Каждый агент описывается вектором состояния:

$$s_i(t) = \{x_i(t), y_i(t), z_i(t), v_i(t)\} \quad (2.1)$$

$$s_i(t) = \{x_i(t), y_i(t), z_i(t), v_i(t), \theta_i(t), \phi_i(t)\} \quad (2.2)$$

где: x, y, z – координаты, v – скорость, а для формулы 2.2 где учитываются, например тангаж и крен θ, ϕ – углы ориентации

Тогда уравнение движения агента будет иметь следующий вид:

$$\frac{dS_i}{dt} = f(k) \quad (2.3)$$

где: k – взаимодействие с другими агентами (избежание столкновений) [30].

Модели избегания столкновений:

Наиболее распространённые методы:

- ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance) – нацелена на расчёт допустимых скоростей с учётом движения других агентов;
- Velocity Obstacle (VO) – определение недопустимых векторов движения;
- RVO – модификация VO, учитывает реакцию обоих агентов;
- Artificial Potential Fields (APF) – агенты отталкиваются от препятствий и тянутся к целям.

Макроскопические модели применяются для группового поведения или общего потока БПЛА, Аналогичны моделям в газовой динамике и наземном транспорте. Сюда относится уравнение непрерывности потока (1.4) и модель на основе ячеек (Cellular Automata) которые упоминались выше [24].

В трёхмерной графике крайне важно учитывать эшелонирование и разделение по высоте. Отсюда вытекает **модель эшелонов**. Где каждый слой ассоциирован с направлением, управляющие правила запрещают нахождение

более одного агента в эшелоне в определённой зоне в заданное время. Данная модель подобна модели air traffic control в авиации, но автоматизирована.

При наличии неопределённости (например, ошибки позиционирования, изменения маршрута) вводятся **вероятностные модели**:

- **Марковские модели (НММ)**, прогнозируют будущее состояние агента на основе вероятностей перехода [28];
- **Методы Монте-Карло** – моделирование множества возможных траекторий и выбор наименее конфликтной⁴
- **POMDP (*Partially Observable Decision Processes*)** – моделирование при частичной информации о среде [29].

Таким образом можно сказать, что математические модели трёхмерного воздушного потока требуют сочетания микроскопических (индивидуальных) и макроскопических (агрегированных) подходов, а также использования вероятностных методов и адаптивных систем управления.

Глава III. Оригинальные результаты: разработка приложения

Для моделирования и изучения свойств Z_d – транспортных потоков, логистики таких транспортных сетей нами разрабатывается приложение. В основу движения каждого летательного аппарата (ЛА) разумно положить следующие принципы:

1. Движение разбивается на 4 этапа:

- a. **Предполетная подготовка** в течение времени τ - **стоянка** на специально отведенной площадке (зарядка – заправка ЛА, перерыв для пилота, определение пункта назначения B и летных характеристик)
- b. **Набор высоты**
- c. **Горизонтальный полет** на пункт назначения
- d. **Снижение**

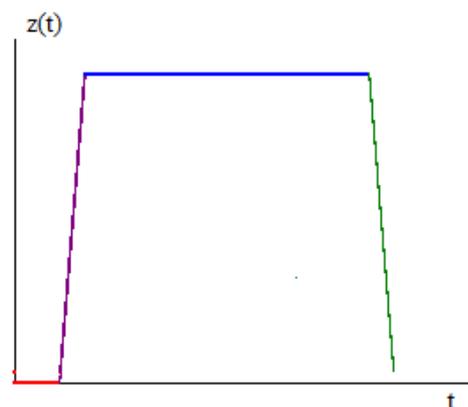


Рис. 1. Этапы полета: стоянка, набор высоты, горизонтальный полет, снижение к пункту назначения

2. Поднимаемся на высоту не выше предстоящей дальности
3. Время стоянки может быть величиной случайной
4. Для повышения точности посадки управление ЛА необходимо оснастить возможностью коррекции траектории и скоростей с помощью включения соответствующих ускорений.
5. Для избегания столкновений в воздухе можно использовать некоторые принципы коллективного движения особи в стае (сохранение дистанции, отталкивание от препятствий).

В приложении задается случайная транспортная сеть с N_V остановочными пунктами, расположенными в одной плоскости (код легко модифицируется до 3d-расположения остановок), и N летательными аппаратами. Далее моделируется движение множества летательных аппаратов путем описания состояния (\vec{r}, \vec{v}) каждого ЛА и дальнейшим численным решением его уравнения движения. Такого типа модель относится к **микроскопическим моделям**. На рисунке 2 показан пример такой транспортной сети (ТС) с 20 остановочными пунктами и ЛА на ней. На рисунке 3 показаны некоторые моменты модельной динамики, в том числе, вид сбоку, воздушных транспортных сетей в приложении с различными N_V .

Развитие логистики привычной нам гражданской авиации (самолеты, вертолеты) привело к необходимости определения так называемых «воздушных коридоров» для движения ЛА – то есть таких воздушных тоннелей, в которых расположены примерные трассы для движения соответствующих ЛА, разрешенные маршруты и траектории. Вероятно, это продиктовано необходимостью подключения такого транспорта к другим транспортным и коммуникационным сетям (ж/д, автобусы, электроснабжение и другая инфраструктура), необходимостью обслуживать

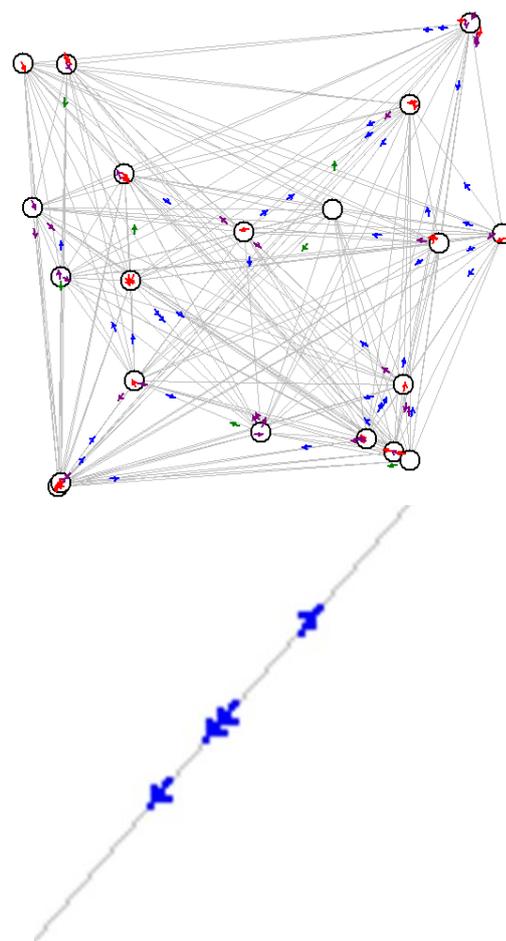
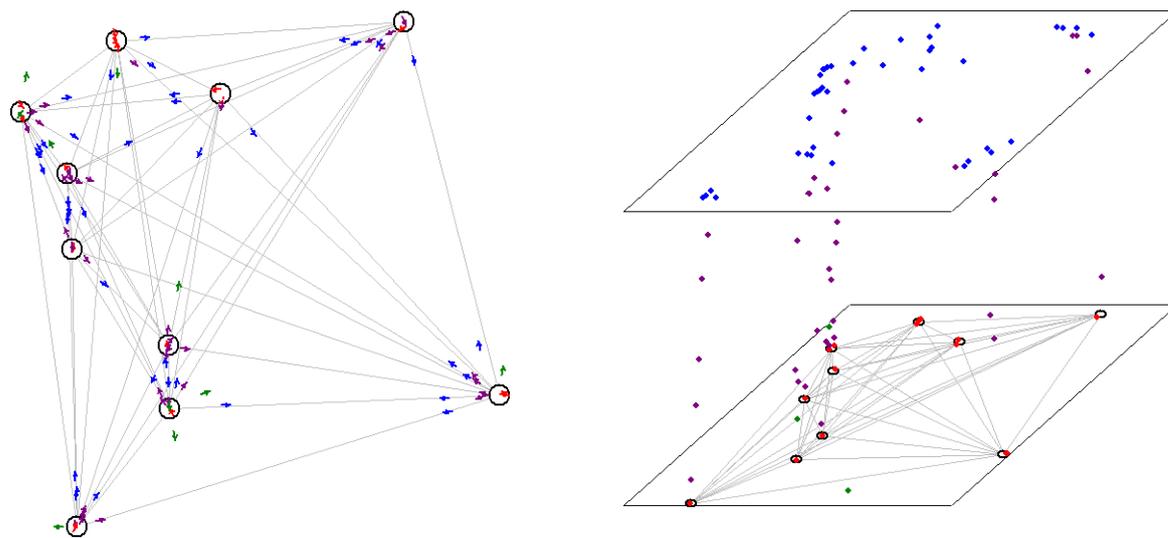
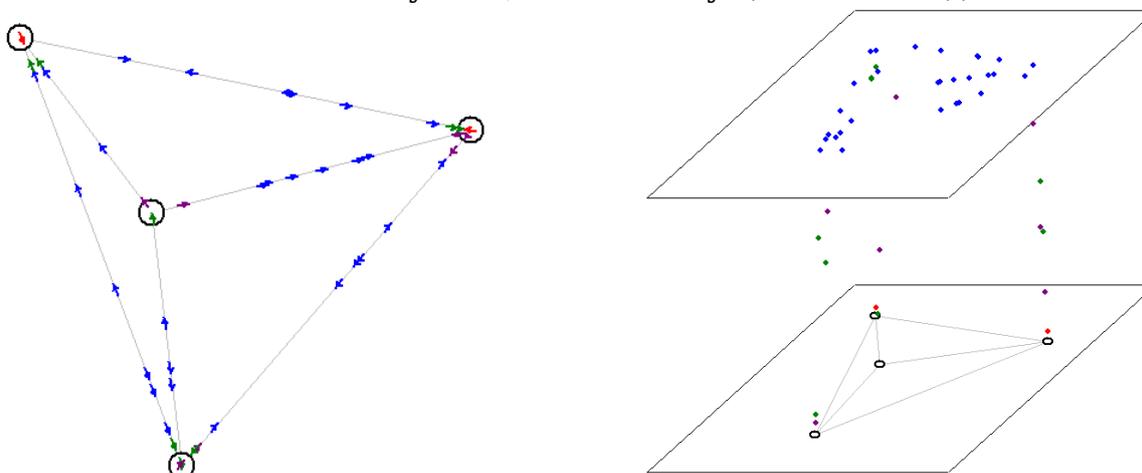


Рис. 2. Транспортная сеть с 20-ю остановочными пунктами и ЛА. Изображение ЛА в модели («самолетик»)

Начало рабочего дня: общий взлет вереницей на ТС с $N_v=10$



4 остановочных пункта, 60 ЛА: текущий момент динамики



3 остановочных пункта, 60 ЛА: текущий момент динамики

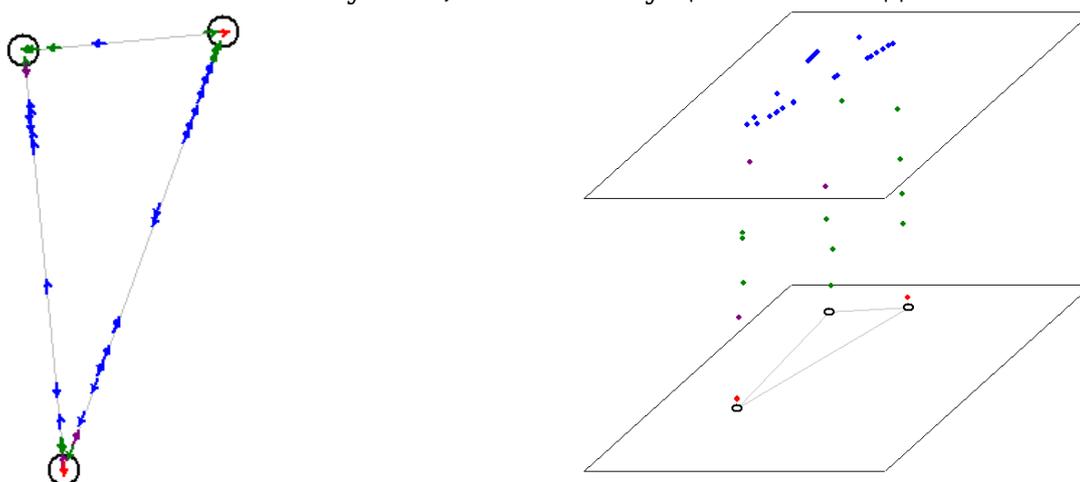


Рис. 3. Вид сверху и сбоку модельной ТС с небольшим числом N_v

и контролировать эти маршруты, обеспечивать их безопасность, бесстолкновительное движение и бесперебойную работу. Для новейших видов

воздушного транспорта (воздушные такси, грузовые БПЛА и др.), которые обсуждаются в работе, с большой вероятностью комфортная и оптимальная логистика также потребует введения воздушных коридоров, хотя здесь ввиду компактности и большей мобильности этих ЛА свободы в их определении может быть существенно больше. Мы полагаем, что наблюдение за работой приложения может продемонстрировать какую-то степень необходимости или пользы от введения для этого типа транспорта воздушных коридоров.

Проблема № 1: Гидродинамика воздушных перелетов

Основные закономерности как 2D-, так и 3D- транспортных потоков оперируют такими основными характеристиками, как

- средняя скорость потока,
- концентрация транспортных средств,
- поток транспортных средств,
- плотность потока ТС.

Фазовые переходы в этих системах также тесно связаны с этими параметрами. Поэтому мы посчитали, что знакомство с проблематикой данной модели следует начать именно с наблюдения за этими величинами и их анализом. А затем уже – за их модификациями при внешнем эшелонировании (расстановке по вертикали, в колонне, в шеренге), то есть контроле сохранения дистанций (вертикальной, лобовой и боковой), регулировании диспетчерской службой и т.д.

Мы рассчитали поток транспортных средств в некотором выбранном воздушном коридоре, поднимающимся над произвольным выбранным остановочным пунктом. Результаты приведены на рисунке ниже (рис. 4). Подъем функции от нуля до больших значений с дальнейшим спадом обусловлен тем, что в начале рабочего дня все ТС устремляются вверх со стоянки, а в стационарном режиме работы сети имеется как поднимающийся вверх, так и движущийся вниз поток ТС, идущих на посадку.

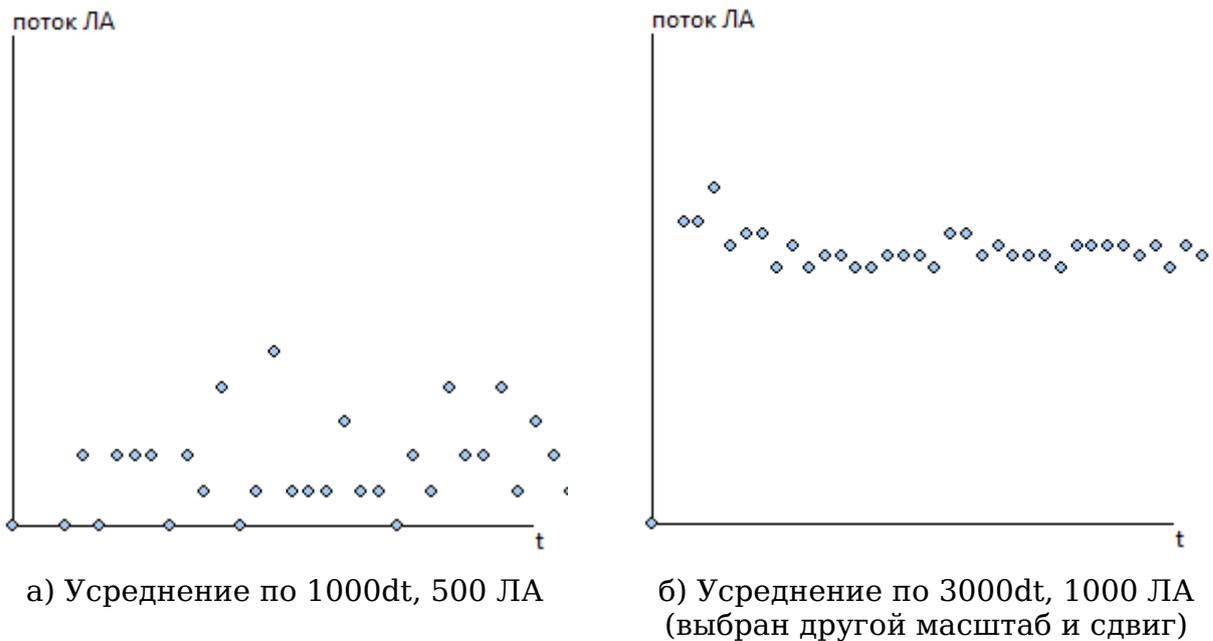
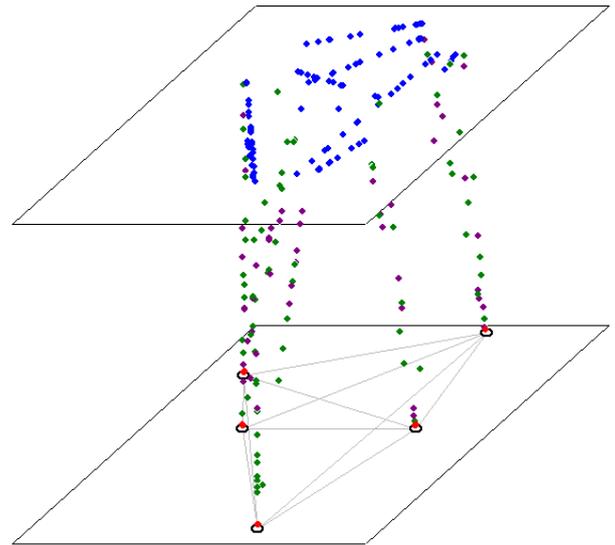
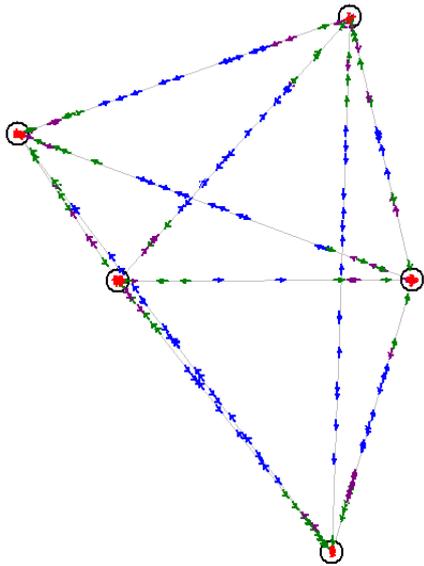


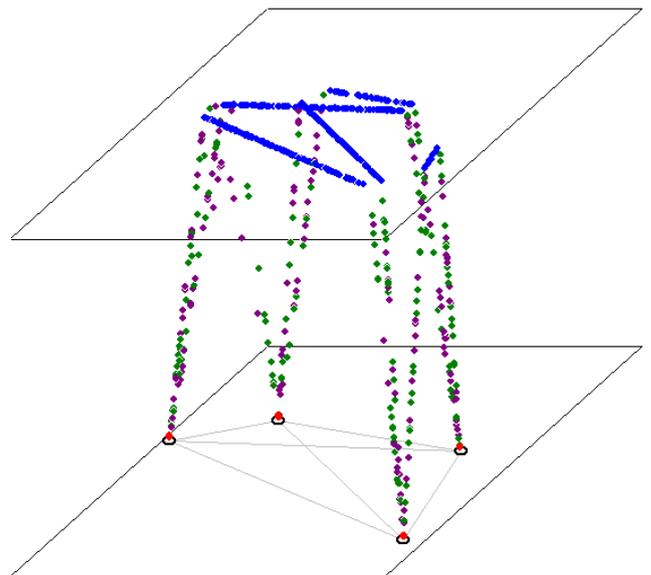
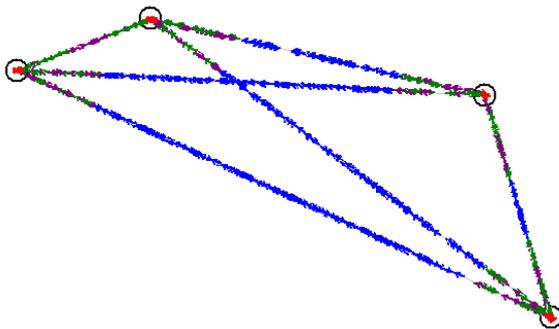
Рис. 4. Расчет текущего потока транспортных средств в воздушном коридоре (результаты моделирования в приложении)

В соответствии с интуитивными ожиданиями, поток, состоящий из отдельных ТС, дискретен: чем меньше транспортных средств, тем больше интервалов времени, для которых поперечную площадку не пересечет ни одно ТС. При увеличении интервала усреднения будут получаться все более близкие между собой значения с постоянным трендом (константа), соответствующим стационарному движению потока.

Отметим, что в отсутствие «нагрузки» (пассажиров) программа может работать в таком режиме устойчиво, стабильно, часами, до бесконечности (рис. 5).



Вид модельной транспортной сети спустя 7 часов непрерывной работы, 500 ЛА



Вид модельной транспортной сети спустя 3 часа непрерывной работы, 1000 ЛА

Рис.5. Стабильность работы алгоритма в отсутствие нагрузки (пассажиры).
Транспортный полигон с ЛА и вид сбоку

Проблема № 2: загруженность транспортной сети – задача теории массового обслуживания

Существенная особенность задачи о движении аэротакси – это то, что летательные аппараты (ЛА, пилотируемые - ПЛА) движутся не сами по себе с целью прогулки, а выполняют определенные функции, а именно перевозят грузы или пассажиров. Поэтому их движение подчинено системе заказов.

Каковы важнейшие аспекты такой задачи?

1. *Режимы работы системы.* В нормальном стационарном режиме функционирования в системе **не должно быть больших задержек с выполнением заказов.** Потому что большое время ожидания выполнения заказа – это своего рода затор, пробка, только по времени:

Большое время ожидания = затор

Это влечет за собой также возникновение очагов повышенной концентрации пассажиров («**часы пик**»). В таком режиме транспортная сеть не будет справляться со своими задачами. Это фаза пробок. При моделировании различные фазы можно отображать цветом – красный (пробка), желтый, зеленый (норма).

2. *Отличие системы аэротакси от системы авиасообщения.* Авиасообщение (самолеты) – транспортные перевозки осуществляются крупными судами с большим числом пассажиров, поэтому они осуществляются по строгому **расписанию**, контролю перевозок, безопасности полетов и т.д. – диспетчеризации. Перевозки с помощью вертолетов эпизодичны, затратны, у них свой специфический известный функционал.

В отличие от этих систем *аэротакси* задумывается как мобильный перевозчик, у которого **нет расписания, а есть заказы**. Поэтому эту систему сложнее регулировать и обеспечивать безопасность полетов.

В связи с отмеченными факторами для описания загруженности транспортной сети аэротакси будет уместна следующая модель.

Модель

Имеется две подсистемы – *подсистема аэротакси* (летательных аппаратов, ЛА) и *подсистема пользователей* этой транспортной сети (пассажиры, грузы). Кроме того, есть еще третья подсистема - подсистема остановочных пунктов (т.н. *транспортный полигон*)

Пусть:

- N – количество ЛА
- Nu – среднее количество пользователей сети
- Nv – количество вершин транспортного полигона (стоянок)

(если пассажир/ груз долетел до пункта назначения и выходит из подсистемы пассажиров, в подсистеме появляется новый пассажир/груз так, что полное число пользователей сети в среднем одно и то же)

1. Распределение машин N случайно в среднем равномерно по сети
2. Распределение пассажиров и времен заказов случайно и равномерно в среднем по ТС и по времени.

Проблема (ключевой вопрос):

Как в зависимости от соотношения числа машин и числа пользователей N/Nu меняется степень загруженности сети и среднее время ожидания заказов? (определить области реализации различных фаз)

В такой постановке ясно, что эта задача будет в целом аналогична любым задачам массового обслуживания (обычное такси, обслуживание клиентов в сети ресторанов общественного питания типа ROSTIC'S и т.д.), однако ясно, что

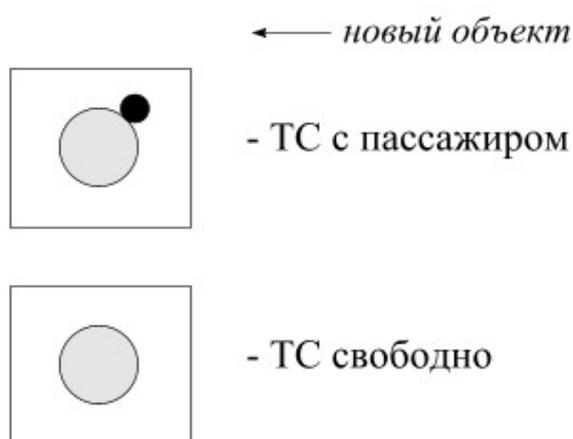
специфика мобильных аэроперелетов в соединении с задачей массового обслуживания здесь создаст свою синергетическую сложность и *уникальность с рядом особенностей*.

В учебниках по логистике транспортных сетей уже описано явление **синергии**:

при контроле в одних руках нескольких подсистем (например, транспортная подсистема, гостиницы, сети питания и т.д.) положительный эффект оказывается больше, чем сумма эффектов при независимом управлении отдельными подсистемами (например, А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецов и др., *Введение в транспортную логистику*, 2011).

Как это смоделировать?

1. На транспортной сети (транспортный полигон с рядом остановочных пунктов и размещенными на ней аэротакси) размещаем пользователей (случайно)
2. В случайные моменты времени у каждого пользователя возникает заказ – маршрут АВ.



Существенная особенность: во время полета координаты пользователя совпадают с координатами транспортного средства. Фактически добавляется только параметр - есть пассажир или нет (см. рис. 6).

Рис. 6. Ключевые объекты модели

Ясно следующее: на остановочном пункте, число которых не очень велико по городу (порядка нескольких десятков) будут возникать очаги локализации пользователей, желающих осуществить перелет по нужному маршруту, там же – множества ЛА на стоянках, готовых осуществить эти перевозки. Очевидно, посадка в транспортные средства будет осуществляться по очереди как для пассажиров, так и для такси. Таким образом, на стоянках будут возникать **две очереди**: одна – очередь пассажиров или грузов, ожидающих возможность осуществить перелет, - и вторая – очередь аэротакси, ожидающих свое время для посадки пассажира. В литературе задачи массового обслуживания могут так и называться – **теория очередей**. Программно они связаны с необходимостью описания стеков, маршрутизации (роутеров) и т.д., и технологически очень сложны. Эта часть модели в нашей исследовательской группе сейчас находится на стадии разработки, и до конца не завершена. Для примера ниже приведем **часть программного кода**.

Сущностные элементы программного кода (относящиеся к задаче массового обслуживания):

```

procedure init_of_new_user;
var phi : real;
begin
    ju_A[k]:=random(Nv)+1;           // разыгрываем номер площадки j для k-того пользователя,
                                    // предыдущий пользователь под этим номером доехал до пункта B
                                    // random(n) выдает значения 0.. (n-1)

    xu[k]:=xv[ju_A[k]];
    yu[k]:=yv[ju_A[k]];
    zu[k]:=zv[ju_A[k]];             phi:=2*pi*random; xu_gate[k]:=xu[k] + 2.0*rV*cos(phi); xu[k]:=xu_gate[k];
                                    yu_gate[k]:=yu[k] + 2.0*rV*sin(phi); yu[k]:=yu_gate[k];

    step_u[k]:=1;
    t0_u[k]:=t;                     // момент начала времени для k-того user'a
    taxi[k]:=0;                     // к такси не прикреплены
    pos_u[k]:=l_st_u[ju_A[k]]+1;    // возм здесь нужно присвоить позицию в очереди
end;

procedure first_config;
var phi : real;
begin
    randomize;
    // размещаем ЛА на TC           // TC - транспортная сеть (вар - транспортное средство...)
    for i:=1 to N do begin
        jA[i]:=random(Nv)+1;       // текущий номер площадки j для i-того ЛА, random(n) выдает значения 0.. (n-1)

        x[i]:=xv[jA[i]]*(1-rV + 2*rV*random); // чтоб ЛА друг на друге не стояли на остановочном пункте
        y[i]:=yv[jA[i]]*(1-rV + 2*rV*random);
        z[i]:=zv[jA[i]];

        step[i]:=1; col[i]:=clred;
        tau[i]:=tau_p * 1 * random; // время перерыва
    end;

    // размещаем пользователей TC

    for k:=1 to Nu do init_of_new_user;

    white_board;
end;

// встаем в очередь свободных такси и ждем пассажира
// маршрут для ЛА и выбор полетных характеристик ДЛЯ ЛА
procedure Route_for_FA;
var xA, yA, zA, alpha, r_AB : real;
begin
    // t0[i] - начало перерыва i-того ЛА
    // random(n) выдает значения от 0 до n-1
    // repeat jB[i]:=random(Nv)+1; until jB[i]<>jA[i]; // выбираем случайно пункт назначения B, чтобы он не совпал с пунктом A
    jB[i]:=ju_B[k1];
    // определяем летные характеристики (скорость и др.)

    yB[i]:=yv[jB[i]];   yA:=y[i];
    xB[i]:=xv[jB[i]];   xA:=x[i];
    zB[i]:=zv[jB[i]];   zA:=z[i];

    alpha:=arctan((yB[i]-yA)/(xB[i]-xA)); if (xB[i]-xA)<0 then alpha:=alpha+pi; // в 3D нужно будет определять направл косинусы
    vx[i]:=v0*cos(alpha); vy[i]:=v0*sin(alpha); vz[i]:=vz0;

    r_AB:=sqrt( sqrt( xB[i] - xA ) + sqrt( yB[i] - yA ) ); // если остановки будут иметь ненулевую высоту,
                                                            // это нужно будет скорректировать
    h[i]:=r_AB; if h[i] > hmax then h[i]:=hmax; // поднимаемся на высоту не выше дальности
end;

procedure taxi_order_for_U;
begin
    repeat ju_B[k]:=random(Nv)+1; until ju_B[k]<>ju_A[k]; // выбираем случайно пункт назначения B,
                                                            // чтобы он не совпал с пунктом A
end;

procedure move_the_stack_u;
var stack_new : array[1..lmax] of integer;
    ii, lu : integer;

```

```

begin
    // смещаем очередь пользователей, ожидающих такси на j-той стоянке, на 1 позицию ---
    ii:=1;
    repeat
        stack_new[ii]:=stack_u[j,ii+1]; // stack_u[j,ii] - это номер пользователя (k), стоящего в очереди
        // на j-той стоянке на ii-том месте
        inc(ii);
    until stack_u[j,ii]=0;

    lu:=ii-1; l_st_u[j]:=lu; // длина очереди уменьшилась на 1, т.к. 1 пассажир улетел

    for ii:=1 to lu do begin stack_u[j,ii]:=stack_new[ii]; // это номер пользователя на ii-том месте в очереди
        pos_u[stack_u[j,ii]]:=ii; // присваиваем новые позиции в очереди пользователям
    end;
    for ii:=lu+1 to lmax do stack_u[j,ii]:=0; // оставшийся хвост очереди обнуляем
end;

procedure move_the_stack_FA;
var stack_new : array[1..lmax] of integer;
    ii, l : integer;

begin
    // смещаем очередь такси на j-той стоянке на 1 позицию -----
    ii:=1;
    repeat
        stack_new[ii]:=stack_FA[j,ii+1]; // stack_FA[j,ii] - это номер машины, стоящей в очереди
        // на j-той стоянке на ii-том месте
        inc(ii);
    until stack_FA[j,ii]=0;
    l:=ii-1; l_st_FA[j]:=l; // длина очереди такси уменьшается на 1, т.к. 1 такси улетело

    for ii:=1 to l do begin stack_FA[j,ii]:=stack_new[ii]; // это и есть номер лет аппарата
        pos_FA[stack_FA[j,ii]]:=ii; // новые позиции ЛА в очереди ???
    end;
    for ii:=l+1 to lmax do stack_FA[j,ii]:=0;
end;

procedure dogovor;
begin
    // определяем номер стоянки, на которой мы стоим: - это jA[i]

    k1:=stack_u[jA[i],1]; // в последовательности stack_u[j,1] у j-той площадки на первом месте стоит
    // номер пассажира, первого в очереди
    // здесь мы можем выбирать из множества (т.е. мы не на узле i), но берем 1-го в очереди
    taxi[k1]:=i; // - это информация для пассажира, его маршрутный лист ("такси для пользователя k1 - это i")

    user[i]:=k1; // - это информация для ЛА, его маршрутизация ("пользователь для i-того такси - это k1")
    // это та же самая связь, просто так удобнее

    // если какие-то пассажиры будут уходить в поездку, очередь будет двигаться,
    // т.к кто-то из пассажиров 1ый на стоянке

    // посадка в / (прикрепление к) такси -----
    // действия для user'a

    step_u[k1]:=2; // переходим к след (2) этапу для пользователя (летим вместе с такси под номером i)
    // раз данный пассажир улетает, длина очереди сокращается на 1 - это происходит
    // в процедуре move_the_stack_u;
    move_the_stack_u; // смещаем очередь пассажиров на 1 на j-той стоянке // когда прилетит, инициализиру нового user'a
    move_the_stack_FA; // смещаем очередь такси на j-той стоянке на 1 поз. -при этом длина очереди такси тоже уменьш на 1
end;

procedure step_u_1; // этап 1 для пользователя - стоим и ждем ЛА
begin
    // если человек - пассажир, значит, у него уже в первое мгновение этой роли есть цель (маршрут АВ)

    if abs(t-t0_u[k])<dt then begin
        taxi_order_for_U; // делаем заказ такси в первое мгновение инициализации как user'a
        // дальше просто ждем, когда придет такси:
        // если на этой остановке появляется "зеленое" такси (готовое к полету),
        // (после прилета сначала красное - подготовка ЛА к полету, потом - зеленое)
        // договариваемся (договор перевозки, т.к. свободных машин может быть
        // много), и начинаем полет
        inc(l_st_u[j]); // увеличить на 1 длину очереди пользователей на j-той стоянке
        stack_u[j, l_st_u[j]]:=k; // встать в конец очереди на j-ой площадке под номером l_st_u[j]
    end;
end;

```

```

// Это последовательность номеров пассажиров в очереди на полет
// на этой стоянке
end;

// если какие-то пассажиры будут уходить в поездку, очередь будет двигаться, т.к кто-то из пассажиров 1ый на стоянке
// посадка в / (прикрепление к) такси -----
// действия для user'a

// если ваш номер в очереди 1-ый, то садимся в такси под номером 1
if pos_u[k]=1 then begin
//dogovor; повтор // договор перевозки k-го пользователя и i-го судна
step_u[k]:=2; // переходим к след (2) этапу для польз (летим вместе с такси под номером i)
move_the_stack_u; // смещаем очередь пассажиров на 1 на j-той стоянке
// когда прилетит, инициализировать нового user'a
end;

// если условия не выполнены, то просто стоим ждем, время идет
end;

procedure step_u_2; // этап 2 для пользователя - летим вместе с ЛА
begin
xu[k]:=x[taxi[k]]+rV/2;
yu[k]:=y[taxi[k]];
zu[k]:=z[taxi[k]];

if taxi[k]=0 {пассажир прилетел и освободился}
then begin
step_u[k]:=1;
init_of_new_user;
end;
end;

procedure step_11; // действия для ЛА и стоянки
begin // стоим в очереди с зеленым световым сигналом

// если позиция такси в очереди = 1 (на J-той площадке какое-н такси обязат стоит в очереди 1ым),
// поэтому очередь подвинется
// то берем пассажира с номером 1 и переходим к шагу 2 (взлет)

if (pos_FA[i]=1) {and ( l_st_u[jA[i]] <> 0 )} then begin // а если нет пассажиров, то стоим!!! договор не оформляем
dogovor; // связываем i-тое такси и k - того пассажира (груз, пользователя)

// знаем пассажира k1:=stack_u[jA[i],1];
// стоянку jA[i]
// номер машины taxi[k1]:=i;
step[i]:=2; col[i]:=clpurple; vz[i]:=vz0;

Route_for_FA; // определяем пункт назначения и полетные характеристики
end;
end;

procedure step_1; // стоим на перерыве (находимся в цикле на i-той машине)
begin // если перерыв tau[i] закончился
if t > t0[i]+tau[i] then begin inc(l_st_FA[j]); // увеличить на 1 количество свободных машин на j-той стоянке
// то есть длину очереди
stack_FA[j, l_st_FA[j]]:=i; // встать в конец очереди на j-ой площадке под номером l_st_FA[j]
// Это последовательность номеров ЛА в очереди на полет на этой стоянке
step[i]:=11; // перейти ко второй части стоянки - стояние в очереди с зеленым сигналом
end;
end;

procedure step_2; // взлетаем
begin
x[i]:=x[i]+vx[i]*dt;
y[i]:=y[i]+vy[i]*dt;
z[i]:=z[i]+vz[i]*dt;

if z[i]>h[i] then begin step[i]:=3; vz[i]:=0; col[i]:=clblue; end;
end;

procedure step_3; // летим
var v_xy, tg_a0, tg_a, r_AB_0, r_AB : real;
begin

```

```

x[i]:=x[i]+vx[i]*dt;
y[i]:=y[i]+vy[i]*dt;
z[i]:=z[i]+vz[i]*dt;

v_xy:=sqrt( sqr(vx[i]) + sqr(vy[i]) ); // далее мониторим, не пора ли садиться:
tg_a0 :=vz0/v_xy; // горизонтальная скорость
r_AB_0:=h[i]/tg_a0; // под каким углом полетим, если начнем садиться сейчас со ск vz0
r_AB:=sqrt( sqr(x[i]-xB[i]) + sqr(y[i]-yB[i]) ); // расстояние до точки посадки, если начнем садиться сейчас
// текущее расстояние до цели по горизонтали

// промазывание мимо В возникает, когда А и В слишком близко расположены
// (очень часто - при 4 ех вершинах)
// Если мы поднялись только, а r_AB уже меньше, чем нужно при таких vx, vy
// Тогда мы можем подобрать vz:

// реальный текущий угол на цель:
tg_a:=z[i]/r_AB;

if r_AB < r_AB_0 then begin step[i]:=4; vz[i]:=-v_xy*tg_a;{vz0 было} col[i]:=clgreen; end;
end;

procedure ax_ay_az;
var v, r_AB, cos_ax_v, cos_ay_v, cos_az_v,
    cos_ax_r_AB, cos_ay_r_AB, cos_az_r_AB : real;
begin
//pA pB:=
// определяем направляющие косинусы движения (скорости) и направляющие косинусы направления на цель
// если они отличаются больше на ... градусов, корректируем движение
// корректировать можно включением ускорения линейного, а можно - изменением направления при неизменной скорости

v:=sqrt( sqr(vx[i]) + sqr(vy[i]) + sqr(vz[i]) ); r_AB:=sqrt( sqr(xB[i]-x[i]) + sqr(yB[i]-y[i]) + sqr(zB[i]-z[i]) );
// напр. кос. v // напр. кос. на цель - 'правильные'
cos_ax_v:=vx[i]/v; cos_ax_r_AB:=(xB[i]-x[i])/r_AB;
cos_ay_v:=vy[i]/v; cos_ay_r_AB:=(yB[i]-y[i])/r_AB;
cos_az_v:=vz[i]/v; cos_az_r_AB:=(zB[i]-z[i])/r_AB;

if ( abs( (cos_ax_v-cos_ax_r_AB)/cos_ax_r_AB > 0.01) or
    ( abs( (cos_ay_v-cos_ay_r_AB)/cos_ay_r_AB > 0.01) or
    ( abs( (cos_az_v-cos_az_r_AB)/cos_az_r_AB > 0.01) ) then begin
    vx[i]:=v*cos_ax_r_AB; // если летим мимо, корректируем угол на правильный
    vy[i]:=v*cos_ay_r_AB;
    vz[i]:=v*cos_az_r_AB;
end;
end;

procedure step_4; // садимся, снижение
var k_i : integer;
begin
x[i]:=x[i]+vx[i]*dt;
y[i]:=y[i]+vy[i]*dt;
z[i]:=z[i]+vz[i]*dt;

ax_ay_az; // корректировка движения

vx[i]:=vx[i]+ax[i]*dt;
vy[i]:=vy[i]+ay[i]*dt;
vz[i]:=vz[i]+az[i]*dt;

if sqrt( sqr(x[i] - xB[i]) + sqr(y[i] - yB[i]) + sqr(z[i] - zB[i])) < 0.1*rv

// П Р И Л Е Т Е Л И :
then begin step[i]:=1; tau[i]:=tau_p*3*random; // выбираем интервал очередного перерыва (отдых-заправка-ремонт)
t0[i]:=t+dt; col[i]:=clred; jA[i]:=jB[i]; // пункт назначения стал снова начальным стартовым пунктом
k_i:=user[i]; // номер доставленного пассажира
user[i]:=0; // пассажира высадили
taxi[k_i]:=0; // пассажир свободен
end;
end;
procedure draw_z_t;
const r=2;
i_z = 5; // номер частицы, график для которой отображаем
begin
with form1.paintbox3.canvas do begin
x1:=round(20+(t-t0[i_z])/(2.5*tau0)*(mx3-40));
y1:=round(my3-20-z[i_z] / (1.2*hmax)*(my3-40));
pen.color:=col[i_z]; pen.Width:=1; ellipse(x1-r, y1-r, x1+r, y1+r);
end;
end;
end;

```

```

procedure evolution;
begin
  first_config;

  t:=0;
  repeat          // у каждого ЛА свои (несовпадающие) многочисленные моменты старта во время эволюции
                  // - особенность существенная

  // пересчет положений -----
  // ПЛА
  xs:=x; ys:=y; zs:=z; vxs:=vx; vys:=vy; vzs:=vz;          // нужно для рисования (скорости - для самолетика)

  for i:=1 to N do begin      if step[i]=1 then step_1;          // I этап - определяем пункт назначения + время тау стоим на площадке
                              // - предполетная подготовка, зарядка, заправка и тп;
                              if step[i]=11 then step_11;
                              if step[i]=2 then step_2;          // II этап - набираем высоту
                              if step[i]=3 then step_3;          // III этап - летим примерно горизонтально на пункт назначения
                              if step[i]=4 then step_4;          // IV этап - снижаемся, сброс высоты
                              draw_z_t;
  end;

  // пассажиров : у пассажиров только 2 этапа: 1) - жду на остановке 2) - лечу вместе с ЛА
  xus:=xu; yus:=yu; zus:=zu;
  for k:=1 to Nu do begin
    if step_u[k]=1 then step_u_1;
    if step_u[k]=2 then step_u_2;
  end;

  // отрисовка новых положений -----

  draw_net; draw_net_3d;
  draw_FA; draw_FA_3d;
  Application.ProcessMessages;
  t:=t+dt;
  until process_end=true;
end;

procedure main;
begin
  vertices;

  evolution;

end;

```

Важно отметить также, что в этой модели у ТС стоянка разбивается на **2 интервала: предполетная подготовка** (отдых пилота, заправка, ремонт) (*такси в нерабочем состоянии с «красным световым сигналом»*) и **ожидание посадки в очереди** таких же транспортных средств на стоянке (*такси с «зеленым световым сигналом»*).

В результате работы программы можно увидеть, что на остановочных пунктах имеются множества пассажиров, транспортные средства (ЛА) осуществляют полет с пассажирами (рис. 7). Однако пока имеется ряд некорректных моментов, работа над этой моделью продолжается.

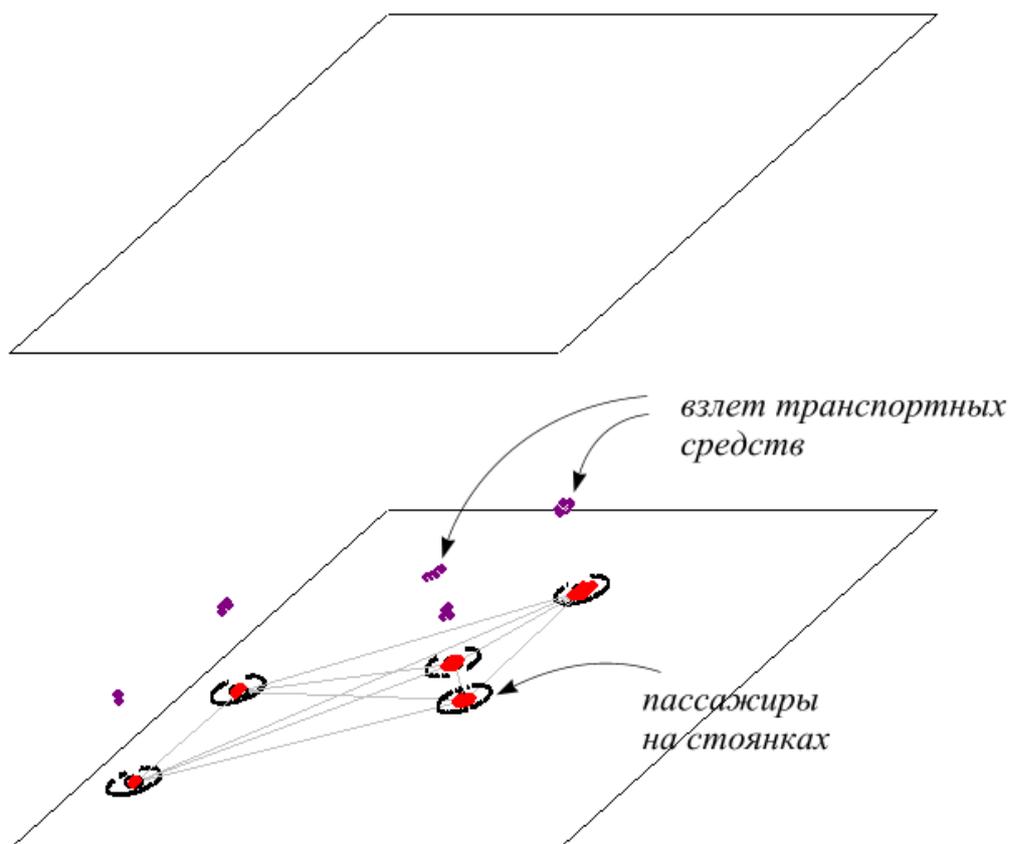


Рис. 7. Разработка проблемы загруженности транспортной сети. Показаны пассажиры в очереди на стоянках и взлетающие из второй очереди аэротакси

Перспективные направления разработки модели

1. Дальнейшее исследование проблемы загруженности транспортной сети (задача массового обслуживания)
2. Введение в модель эшелонирования 3D – транспортного потока в его автоматическом движении (без диспетчера) – сохранение вертикальной, боковой и лобовой дистанций между ЛА.
3. Использование нефиксированной ширины воздушного коридора в 3D
4. Исследование возможности решения проблемы встречных потоков в данном воздушном коридоре.

Глава IV Разработка методических материалов для проведения занятий со школьниками в рамках обсуждаемой тематики

§ 4.1 Практическая значимость 3D-транспортных потоков для будущего поколения

Современный мир претерпевает стремительную транспортную революцию, вызванную развитием технологий беспилотных летательных аппаратов и воздушного городского пространства (аэротакси). Эти средства перемещения образуют новый тип мобильности – 3D-транспортные потоки, отличающиеся от традиционного наземного транспорта. Их внедрение приведёт к значительным изменениям в городской инфраструктуре, логистике, безопасности, экологии и образе жизни бедующих поколений. Практическая значимость трёхмерного транспортного потока выходит далеко за рамки инженерной новизны, она затрагивает социум, экономику и развитие в целом.

По оценкам ООН к 2050 году более 68% населения Земли будет проживать в городах. Традиционные транспортные сети перегружены, а расширение дорожной инфраструктуры часто невозможно по причинам нехватки пространства или экологических ограничений. На помощь приходят именно трёхмерные потоки, они предлагают выход за пределы горизонтальной плоскости – использование воздушного пространства для разгрузки наземных магистралей.

Практически это означает:

- Уменьшение времени поездки в городах с плотной застройкой (например, мегаполисах типа Токио);
- Снижение транспортных заторов за счёт распределения движения по эшелонам;
- Повышение надёжности логических цепочек и служб экстренного реагирования.

Воздушный транспорт нового поколения ориентирован на электрическую тягу низкий уровень выбросов. Внедрение аэротакси и БПЛА в массовую эксплуатацию способствует достижению цели по декарбонизации транспорта

особенно в городах. Это приведёт к снижению выброса CO_2 за счёт отказа от ДВС, минимизации уровня шума по сравнению с вертолётами и более эффективному использованию энергии благодаря оптимизированным маршрутам в трёхмерном потоке.

Для будущих поколений это означает более чистую и тихую городскую среду, снижение уровня респираторных заболеваний и глобальное смягчение последствий изменения климата.

3D-транспортные системы могут сделать передвижение более доступным для пожилых людей, людей с ограниченными возможностями и жителей отдалённых районов. Аэротакси способно сократить время доступа к медицинским учреждениям, БПЛА-дроны доставлять лекарства в труднодоступные районы, а умные маршруты позволят учитывать физическое состояние пассажира и обеспечить комфортный полёт.

Даже на данный момент времени БПЛА уже применяют в логистике, но их роль значительно возрастёт. Будущие поколения будут жить в мире, где доставка будет происходить кратчайшего срока благодаря трёхмерным транспортным потокам. Это поможет сократить трафик грузовиков на дороге, распределить склады ближе к потребителям, повысить гибкость и устойчивость логических цепочек. Кроме того, это означает что будет возможна экстренная доставка крови, медикаментов, документов и товаров первой необходимости.

Внедрение 3D-транспортных потоков приведёт к появлению новых профессий и сфер занятости. Будущим поколениям предстоит осваивать специальности, которых ещё не существует:

- Операторы системы управления воздушным движением БПЛА;
- Инженеры по планированию воздушной инфраструктуры (вертикальные станции посадки и т.д.);
- Специалисты по кибербезопасности воздушного трафика;
- Архитекторы воздушных маршрутов и эшелонов.

Образование должно будет включать элементы авиационной навигации, ИИ, робототехники, логистики, этики и системного проектирования. Формирование подобных навыков станет частью подготовки ответственных граждан будущего.

Современные алгоритмы БПЛА уже включают автоматическое предотвращение столкновений, распределения маршрутов, адаптацию к погодным условиям и отказоустойчивые системы. Что в будущем должно привести к снижению дорожно-транспортных происшествий, повышению надёжности экстренных служб и возможности быстро реагировать на ЧС. Это означает что будущему поколению также следует быть более осведомлёнными в устройстве данной ситкмы.

Но новые технологии всегда вызывают вопросы:

- Кто несёт ответственность за инцидент в автономной системе?
- Кто обеспечит приватность в условиях постоянного воздушного мониторинга?
- Как защитить воздушное пространство от злоумышленников?

И это не возможные вопросы. Будущим поколениям предстоит формировать новую этику воздушного взаимодействия, писать законодательство и балансировать между эффективностью, безопасностью и правами личности.

Государство, сумевшее первым внедрить новые транспортные технологии, получает геополитическое и экономическое преимущество. Это требует:

- Национальных программ поддержки исследований в области воздушной мобильности;
- Международного сотрудничества в области стандартов и протоколов;
- Обеспечение технологического суверенитета.

Таким образом, развитие транспорта – это не только технологический вызов, но и вопрос национальной стратегии.

Практическая значимость 3D-транспортных потоков для будущих поколений заключается в формировании новой транспортной парадигмы, способной радикально изменить облик системы города. А значит влечёт за собой формирование изменений в образовании и появлении актуальных направлений.

§ 4.2 Методические особенности изучения трёхмерного транспортного потока в школе

Развитие трёхмерных транспортных потоков требует формирования у подростков трёхмерного в том числе инженерного мышления, навыков цифрового моделирования и понимания динамики воздушного движения. Включение темы трёхмерного транспортного потока в школьную программу в виде дополнительных курсов или других форматов занятий, способствует раннему знакомству учащихся с высокотехнологичными отраслями. Поможет сформировать междисциплинарное мышление и подготовить будущих специалистов для рынка труда нового типа.

Введение данной тематики в школьный курс актуально по нескольким причинам:

- Возрастающая роль автономных систем в повседневной жизни;
- Необходимость ранней профориентации на инженерные, авиационные и IT-специальности;
- Переход к «умным» городам и мобильности нового поколения.

Изучение транспортных потоков позволяет реализовать STEM-образование (Science, Technology, Engineering, Mathematics) через практические кейсы, например моделирование полёта дрона, решение задач по плотности потока и скорости, планирование маршрутов.

4.2.1 Методологические подходы

Изучение трёхмерного транспортного потока может быть реализовано через следующие методические подходы:

□ Интегрированный подход

Объединение знаний из:

- Физики (кинематика, динамика, сопротивление воздуха);
- Информатики (программирование, алгоритмы, симуляция);
- Географии (ориентация в пространстве, карты, логистика);

- Математики (векторы, функции, аналитическая геометрия).

Проектно-исследовательский подход:

Создание моделей и симуляторов:

- Учащиеся разрабатывают сценарии полётов БПЛА;
- Используют программные среды;
- Анализируют траектории, расход энергии и безопасность маршрутов.

Проблемно-ориентированный подход:

Осуждение и решение реальных задач, например:

- Как организовать бесперебойную доставку медикаментов дронами в условиях наводнения?
- Какие воздушные коридоры безопасны для аэротакси в условиях плотной городской застройки?

4.2.2 Образовательные инструменты и технологии. Формирование компетенций

Для изучения 3D-транспортных потоков в школе могут использоваться:

- Дроны с открытым программированием (например, Tello EDU);
- VR/AR-среды (моделирование полётов в виртуальном городе);
- Графические симуляторы (SUMO, AirSim);
- 3D-принтеры для создания макетов летательных аппаратов.

С помощью такого набора есть возможность реализации всех вышеперечисленных методических подходов.

В результате изучения учащиеся развивают:

- Системное мышление – понимание сложных взаимосвязей городской системы;
- Пространственное мышление – способность к анализу движения в объёме;
- Цифровые навыки – программирование траекторий, работа с датчиками и симуляторами;
- Инженерную грамотность - работа с чертежами и проектированием.

4.2.3 Препятствия и пути их преодоления

Часто при нововведениях появляются так же и новые проблемы которых не избежать, но можно эффективно их делегировать. Рассмотрим возможные барьеры:

- Недостаточная подготовка преподавателей;
- Ограниченность материальной базы (оборудование, ПО);
- Отсутствие учебных программ и методик.

Возможные пути решения:

- Повышение квалификации педагогов через онлайн курсы (например, на платформе Stepik, Coursera);
- Привлечение партнёров из индустрии;
- Создание открытых методических пособий.
- Возможная интеграция в предмет «Технология» или проведение отдельного спецкурса (внеурочная деятельность).

Таким образом ранее вовлечение школьников в изучение трехмерных транспортных потоков способствует: формированию устойчивого интереса к науке и технике, подготовке к профессиям будущего и воспитанию ответственного отношения к окружающей среде и городской культуре.

Изучение трёхмерного транспортного потока – это инвестиция в будущее. Оно даёт учащимся не только теоретические знания, но и конкретные навыки, меняет их отношение к городу, технологиям и роли человека в нашем быстроменяющемся мире. Такой подход позволит перейти из пассивного потребления технологий к активному участию в их создании и развитии.

4.2.4 Программа спецкурса

Рассмотрим пример программы спецкурса по теме «Воздушные технологии будущего», которая представлена в Таблице 4. Предполагаемая программа ориентирована на обучающихся 7-8 классов и направлена на знакомство с основами трёхмерного транспортного потока его моделирования, построения маршрутов в трёхмерной среде, принципами командной работы и проектной деятельности. Задания разработаны с учётом возрастных особенностей учащихся.

Таблица 4 Календарно тематическое планирование спецкурса «Воздушные технологии будущего».

№ п/п	Время урока	Тема урока	Тип урока	Дидактические единицы	Планируемые результаты		
					Предметные	Личностные	Метапредметные
1	90 минут	Введение в трёхмерный транспорт: дроны и аэротакси	Урок усвоения знаний и умений	3D-транспорт. БПЛА. Аэротакси. Отличия 2D и 3D-поток. Примеры из жизни. Безопасность полётов.	Знание базовых понятий и сфер применения.	Развитие интереса к теме.	Анализ информации, участие в обсуждении.
2	90 минут	Устройство и принципы работы дронов	Урок изучения нового материала	Конструкция дрона. Принципы полета. Стабилизация. GPS. Энергия.	Знание строения и принципов работы.	Познавательная мотивация.	Построение логических цепочек, сравнение.
3	90 минут	Пространственное мышление и маршруты в 3D	Комбинированный	Координаты x, y, z. Безопасные траектории. Ограничения высоты.	Чтение и построение маршрутов в 3D.	Развитие воображения и точности.	Ориентация в пространстве, моделирование.
4	90 минут	Алгоритмы движения дронов	Практико-ориентированный	Простые алгоритмы. Условия и циклы. Визуальное программирование.	Реализация команд движения.	Уверенность в работе с алгоритмами.	Программное мышление, планирование.
5	90 минут	Логистика и диспетчеризация воздушного	Урок исследования	Воздушные потоки. Пересечения	Понимание логистики и расписаний.	Командная работа.	Оптимизация, анализ ситуации.

		трафика		маршрутов. Зоны конфликтов. Приоритеты.			
6	90 минут	Проектирование: от идеи до реализации	Практико-ориентированный	Командное задание: инженеры, логисты, программисты. Общий макет.	Применение знаний в проекте.	Инициативность и распределение ролей.	Проектное мышление, кооперация.
7	90 минут	Презентация командных проектов	Урок защиты проекта	Защита решения по доставке с помощью дрона. Критерии оценки. Обсуждение.	Демонстрация функциональности.	Развитие публичной речи.	Аргументация, анализ решений других.
8	90 минут	Профессии будущего и развитие 3D-транспорта	Итоговый урок	Анализ рынков, профессий: пилот дронов, логист, инженер БПЛА.	Знание реальных направлений развития.	Ориентация в мире профессий.	Прогнозирование, самооценка, формирование мотивации.

Ниже представлены варианты проведения двух уроков, самого первого и последнего.

Урок №1

Тема: 3D-транспортный поток: воздушные технологии будущего.

Цель урока: познакомить учащихся с основами функционирования трёхмерного транспортного потока на примере воздушного движения дронов и аэротакси. Развить навыки командной работы, протонного мышления и предметных компетенций в физике, информатик и географии.

Возрастная категория: 7-8 класс.

Продолжительность: 2 академических часа (90 минут).

Оборудование: проектор, компьютер или ноутбук (для учителя), ноутбуки для учеников (количество зависит от кол-ва групп), бумага, распечатанные карты и задания для групп.

Структура урока

Теоретическая часть (25 минут)

1. Вводная лекция:

Ключевые понятия:

- Что такое трёхмерный транспортный поток;
- Беспилотные летательные аппараты (БПЛА);
- Аэротакси и транспорт будущего;
- Примеры реального использования (Zipline, Amazon Prime Air, Volocopter).

Инструменты: Презентация (с изображений и видео), таблица сравнения 2D и 3D транспорта.

2. Обсуждение

Вопросы классу:

- Где в вашем городе мог бы использоваться 3D транспорт?
- Какие плюсы и минусы у воздушных решений?

Практическая часть (60 минут):

Организация команд

Класс делится на 3 группы:

- **Инженеры** – проектируют модель летательного аппарата для перевозки различных грузов, делают его чертёж на листе с подписями кнопок и т.д.;
- **Программисты** – пишут простейший блокочный алгоритм полёта и доставки грузов, оставляя место для координат;
- **Логисты** – составляют карту доставки: откуда, куда, какие грузы, сколько маршрутов, приоритеты.

Далее группы перемешиваются таким образом чтобы в каждой был инженер, программист и логист. Выдаются задания:

1. Инженеры

- a. Смоделируйте и нарисуйте БПЛА на отдельном листе, подписывая все важные детали.
- b. Напишите характеристики устройства: грузоподъёмность, скорость, высота полёта.

2. Программисты

- a. Нарисовать блок-схему программы БПЛА.
- b. В среде Scratch запрограммировать симулятор маршрута дрона по заданным координатам. Заложить точки старта, повороты и точку посадки, можно дополнительно поставить препятствия или наложить карту. Необходимые элементы: 2 дрона, пункты назначения.

3. Логисты

- a. Определить из заказов какие грузы необходимо доставить и куда;
- b. Распределить приоритеты доставки (можно использовать распечатанную карту или виртуальные карты). Составить графики вылета двух дронов.

Виды грузов и места доставки учитель выбирает на своё усмотрение.

Совместная работа

По завершению этапов группы готовят защиты своих продуктов на выступление даётся 5 минут.

Завершение и обсуждение (5 минут)

Рефлексия:

- Что было самым интересным?
- Какую роль вам хотелось бы выполнять в настоящей разработке?
- Какие сложности возникли?

Урок №8

Тема: Будущее транспорта и профессии завтрашнего дня.

Форма урока: рефлексивно-ориентационный, с элементами дебатов.

Цели урока: проектор, компьютер или ноутбук (для учителя), карточки профессий, шаблон листа «Я в будущем».

- Расширить представление учащихся о будущем транспорта и смежных технологий;
- Познакомить с профессиями, связанными с БПЛА, логистикой, ИИ и 3D-навигацией;
- Развить навыки самооценки, прогнозирования и профориентации;
- Сформировать представления о компетенциях будущего.

Возрастная категория: 7-8 класс.

Продолжительность: 2 академических часа (90 минут).

Оборудование:

Структура урока

Вступление: «Мир 2040 года» (10 минут)

- Учитель предлагает учащимся краткую визуализацию/видео о транспортных системах будущего (например, Hyperloop, аэротакси, умные города);
- Вопрос для обсуждения: «Какие изменения вы ожидаете в транспорте через 15 лет».

Теоретическая часть: «Профессии будущего в транспорте» (15 минут)

Учитель знакомит учащихся с востребованными профессиям:

- Оператор воздушного трафика;
- Инженер-конструктор дронов;
- Программист бортовых систем;
- Специалист по логистике 3D-пространства;
- Юрист по воздушной этике.

Практическая часть: «Профессия будущего: выбери себя» (25 минут):

- Учащиеся получают карточки профессий с описанием;
- В парах обсуждают: какая профессия подходит им больше и почему;
- После обсуждения – «Живая линия»: учащиеся выстраиваются в линию в классе (от «точно моё» до «не моё») по каждой профессии и обосновывают выбор.

Завершение и обсуждение: «Нужен ли нам транспорт в 3D?» (20 минут)

Разделение класса на 2 группы:

- Группа А (оптимисты): считают, что 3D-транспорт решит проблемы городов;
- Группа Б (реалисты): считают, что это создаст новые риски и сложности.

Формат:

- 5 минут – подготовка;
- 5 минут – подготовка аргументов;
- 10-минут обмен мнениями.

Индивидуальное задание «Я в будущем» (15 минут)

Заполнение листа «Моё будущее»:

- Какая сфера мне интересна?
- Какие навыки у меня уже есть?
- Что мне нужно развить?
- Какой шаг я могу сделать уже сейчас?

Завершение (5 минут)

- Учитель подводит итоги: что узнали, о чём задумались;
- Мини-опрос или наклейки на доске: «Этот урок помог мне понять».

4.2.5 Методические рекомендации

В рамках реализации спецкурса для обучающихся 7-8 классов особое значение имеет педагогическая проработка каждого занятия с учётом возрастных особенностей учащихся, межпредметных связей, а также направленности на формирование навыков XXI века: критического мышления, командной работы, цифровой грамотности и проектной деятельности.

Представленные ниже методические рекомендации призваны помочь педагогам эффективно организовать образовательный процесс в соответствии с целями курса. Каждый урок не только раскрывает содержание конкретной темы, но и предполагает активное включение школьников в учебный процесс и деятельность – от ролевого моделирования и инженерного мышления до профессионального самоопределения и анализа современных тенденций в области технологий.

Особенно уделено внимание интеграции элементов STEM-образования, развитию функциональной грамотности и профориентационной составляющей. Всё это делает занятия актуальными, практико-ориентированными и значимыми для обучающихся.

Урок: «3D-транспортный поток: воздушные технологии будущего» предполагается как вступительный или обзорный урок по теме.

Цел урока: познакомить учащихся с базовыми понятиями и примерами воздушного транспорта, его применением и перспективами развития, а также сформировать понимание актуальности темы и личную мотивацию.

Методические акценты:

1. **Концептуализация** – необходимо начинать с понятных «живых» примеров, чтобы заинтересовать учеников.
2. **Визуализация** – нужно использовать:
 - Короткое видео о дронах, авионавигации, автоматических маршрутах.
 - Презентацию с простыми схемами (что такое что такое 3D-траектория, отличие от автомобильного движения);
 - Интерактивную карту (например маршруты полётов).

3. **Групповая работа** – разбиваем класс на мини-команды, которая будет содержать каждую профессию.

4. **Мотивационная часть**

Перед началом урока также рекомендуется провести небольшой опрос для повышения мотивации и внимания учащихся. Возможные вопросы:

- Хотели бы вы добираться в школу на аэротакси?
- Что если бы доставку обеда делал дрон?
- Мини опрос или голосование по теме: «Буду ли я жить в мире летающего транспорта?».

5. **Выводы** – обязательно подвести к формулировке главной идеи:

Летающий транспорт – это не фантастика, а технологическое направление, которое требует комплексного подхода и новых знаний.

Это поможет учащимся настроиться на дальнейшее прохождение курса.

Перед проведением данного занятия стоит учитывать разный уровень подготовки учащихся, нельзя перегружать терминами, это только испугает. Так как это самый первый урок, необходимо заложить именно позитивный фундамент для дальнейшей успешной работы. При моделировании хода урока рекомендуется использовать принцип межпредметных связей, данный шаг сделает урок более разнообразным и интересным, а также позволит понять многогранность темы. Самое главное стимулировать детей задавать вопросы – это урок-пробуждение интереса.

Урок: «Будущее транспорта и профессии завтрашнего дня» предполагается как финальный рефлексивный и профориентационный урок.

Цел урока: подвести итоги спецкурса, помочь учащимся осознать перспективы применения своих навыков в будущих профессиях, связанных с транспортными и цифровыми технологиями.

Методические акценты:

1. **Переход от технологий к человеку** – акцент на то, как ученик может быть включён в развитие технологий не только как потребитель, но и как будущий специалист.

2. **Метод «живой линии» или «позиционирования»:**

- Учащиеся занимают позицию в классе в зависимости от своего отношения к профессии (например, «хочу стать инженером дронов»);
- Обсуждают свою позицию, аргументируют и слушают других.

3. **Работа с карточками профессий**

Это поможет лучше разобраться какая профессия за что отвечает для дальнейшего хода урока. В карточках необходимо указать:

- Краткое описание профессии;
- Необходимые навыки;
- Уровень подготовки/обучения;
- Прогноз на будущее.

4. **Рефлексия и самоанализ**

Особенно важная часть данного урока, так как он является финальным, необходимо подвести итоги не только урока, но и курса в целом.

Предлагаются следующие шаги:

- Анкета или рабочий лист: «какие компетенции у меня уже есть? Что мне интересно? Что стоит развивать?»;
- Можно включить мини-задание «Напиши письмо себе в 2040 году».

5. **Заключительная дискуссия**

Позволит подвести черту в конце всего курса и помочь ученикам сделать выводы. Список тем для обсуждения:

- Технологии решают или создают проблемы?
- Кто будет нужнее: программист или лётчик?
- Сто важнее: техника или правила?

На данном занятии крайне важно дать ученикам высказываться свободно, не оценивая их выбор. Необходимо подчёркивать важность не только технических, но и гуманитарных компетенций, таких как этика, ответственность и коммуникация. Рекомендуется использовать элементы коучинга, помогать ставить личные цели на основе пройденного курса.

Общие методические рекомендации к курсу.

Курс направлен на формирование у школьников базовых представлений о принципах функционирования воздушного транспорта, развитие инженерного, логического и алгоритмического мышления, а также освоения элементов проектной и исследовательской деятельности. А также ориентирован на формирование актуальных навыков будущего.

Методологические принципы организации обучения:

1. Интеграция предметных областей

Занятия курса объединяют знания из физики, информатики, географии, технологии, ОБЖ.

2. Возрастная адаптивность

Занятия и темы адаптированы под возможности 7-8 классов. Преобладают визуальные формы подачи материала, практическая направленность, элементы игры и командной работы.

3. Проектный подход

Все занятия направлены на создание общего продукта – модели будущего транспортного решения. Это усиливает мотивацию, развивает навыки взаимодействия и ответственности за полученный результат.

4. Ролевая и командная организация

Обучающиеся разделяются на функциональные группы и осваивают курс в кооперации, что отражает реальную структуру работы в современных высокотехнологичных проектах.

5. Использование современных образовательных технологий

Это позволит эффективнее развивать тему технологий будущего, основываясь на практическом примере.

- Интерактивные симуляторы и видео;
- Программные среды (например, Scratch, Tinkercad и т.д.);
- Макетирование и визуализация (3D-модели, карты маршрутов и т.д.);
- Цифровые сервисы для презентации проектов.

Благодаря интеграции теории и практики, включению в учебный процесс элементов моделирования, программирования и инженерного проектирования, курс помогает учащимся 7-8 классов по-новому взглянуть на будущее транспорта и собственное профориентирование. Применение активных форм обучения, ролевых моделей и рефлексивных практик делает занятия не только познавательными, но и лично значимыми.

Таким образом, методически грамотно организованный курс способен стать важным инструментом в формировании у школьников целостного понимания современных технологий, а также в развитии интереса к инженерным, техническим и IT – специальностям будущего.

Заключение

Современное развитие транспортной отрасли неразрывно связано с переходом к трёхмерным логическим системам, в которых воздушные беспилотные аппараты и аэротакси становятся основой нового транспортного уклада. В этих условиях особенно важно не только исследовать поведение таких систем с научной точки зрения, но и выстраивать образовательные модели, которые позволят подготовить подрастающее поколение к участию в создании и управлении транспортом будущего.

В ходе данной выпускной квалификационной работы была достигнута основная цель – моделирование и анализ закономерностей трёхмерного транспортного потока и разработка образовательной концепции его интеграции в школьный спецкурс.

Были решены следующие задачи:

1. Проведён анализ и систематизация известных фундаментальных закономерностей двумерного транспортного потока: зависимости между плотностью, скоростью и интенсивностью потока; Особенности перехода моду фазами. Это дало теоретическую базу для дальнейшего сопоставления с 3D-моделью.
2. Разработано программное приложение для моделирования поведения транспортных единиц в трёхмерном транспортном потоке (с возможностью изучения гидродинамики 3d потоков, а также проблемы загруженности транспортной сети - задача теории массового обслуживания).
3. В результате были выявлены характерные особенности 3D-транспортного потока. Установлены зависимости, аналогичные двумерной модели, а также зафиксированы новые закономерности, возникающие из-за наличия дополнительной пространственной степени свободы. Например, расширение пропускной способности за счёт использования эшелонирования и особенности конфликта траекторий.

4. Проведён анализ применимости исследуемой тематики в школьном образовательном пространстве. Выделены разделы, соответствующие учебным программам по физике, технологии информатике и ОБЖ. Обоснована необходимость знакомства школьников с логикой функционирования трёхмерного транспортного потока. Что позволяет развить пространственное мышление, инженерной и цифровой грамотности, а также формированию раннего профессионального интереса к перспективным отраслям.
5. Разработан методический комплекс, включающий календарно-тематическое планирование курса из восьми занятий, два сценария уроков, методические рекомендации и задания.

В качестве апробации научно-исследовательской работы было проведено вводное занятие с учениками 8 класса на базе школы Красноярской университетской гимназии №1 «Универс». А также участие в всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Образование и наука в XXI веке: математика, физика, информатика и технологии в смарт-мире» (Красноярск, Красноярский государственный педагогический университет). Доклад был представлен в очном формате.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Delle Monache, M. L., et al. A Three-Phase Fundamental Diagram from Three-Dimensional Traffic Data // ResearchGate, 2021.
2. Deng, X. Traffic flow simulation of modified cellular automata model based on producer-consumer algorithm [Electronic resource] / X. Deng, Y. Shao, J. Song, H. Wu // PeerJ Computer Science. - 2022. - Vol. 8. - P. e1102. - DOI: 10.7717/peerj-cs.1102. - URL: <https://peerj.com/articles/cs-1102>.
3. Helbing, D. Traffic and related self-driven many-particle systems / D. Helbing // Reviews of Modern Physics. — 2001. — Vol. 73, № 4. — P. 1067–1141.
4. Hoogendoorn, S.P. Traffic Flow Theory and Modelling / S.P. Hoogendoorn, H. van Lint, V.L. Knoop. — Springer, 2015. — 420 p.
5. Kerner, B.S. Three-phase traffic theory and highway capacity / B.S. Kerner // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2004. — Vol. 333. — P. 379–440.
6. Lighthill, M.J. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads / M.J. Lighthill, G.B. Whitham // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. - 1955. - Vol. 229, № 1178. - P. 317-345.
7. Nagel, K. A cellular automaton model for freeway traffic / K. Nagel, M. Schreckenberg // Journal de Physique I. - 1992. - Vol. 2, № 12. - P. 2221-2229. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
8. Treiber, M. Microscopic calibration and validation of traffic models: A case study / M. Treiber, D. Kesting // Transportation Research Part C. — 2017. — Vol. 80. — P. 142–156.
9. Treiber, M. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation / M. Treiber, A. Kesting. - Berlin: Springer, 2013. - 503 p. DOI: 10.1007/978-3-642-32460-4.
10. VISSIM User Manual: Моделирование транспортных потоков / PTV Group. — Karlsruhe: PTV Group, 2022.
11. Zhang, H.M. A theory of nonequilibrium traffic flow/ H.M. Zhang // Transportation Research Part B. — 1998. — Vol. 32, № 7. — P. 485–498.
12. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. / А.А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с. ISBN 978-5-9282-1173-8

13. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. / А.А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.
14. Гасников А.В. Транспортные потоки: модели и методы анализа / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский. - М.: МФТИ, 2013. - 287 с.
15. Герасимов, А. В. Моделирование транспортных потоков: теория и практика / А. В. Герасимов. — М.: Транспорт, 2019. — 384 с.
16. Герман Д., Герман Р. Моделирование транспортных потоков: теория и практика. — М.: Транспорт, 2018. — 342 с.
17. Клеточные автоматы в приложении к моделированию транспортных потоков / А.А. Чечина, Н.Г. Чурбанова, М.А. Трапезникова, А.В. Ермаков, М.С. Герман, А.А. Люпа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 98. 12 с.
18. Костюк В.Н., Левнер В.А. Динамика транспортных потоков на городских магистралях // Автомобильные дороги. — 2020. — № 5. — С. 45-51.
19. Лубашевский И. А., Гусейнзаде Н. Г., Гарнисов К. Г., Лившиц Б. Ю. Фазовые состояния автотранспортных потоков в линейных туннелях. Анализ эмпирических данных // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2008. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fazovye-sostoyaniya-avtotransportnyh-potokov-v-lineynyh-tunnelyah-analiz-empiricheskikh-dannyh>.
20. Методические указания по расчету пропускной способности автомобильных дорог / Министерство транспорта РФ. — М., 2020. — 112 с.
21. Мир транспорта и технологических машин: научно-технический журнал / учредитель ФГБОУ ВО "Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева". – 2025. – № 1-1(88). – ISSN 2073-7432.
22. Михайлов А.Ю., Петров С.К. Современные методы анализа транспортных потоков: монография. — СПб.: Политехника, 2019. — 278 с.
23. Петраков М.П. Теория транспортных потоков и управление дорожным движением. — М.: Академия, 2021. — 415 с. ISBN 978-5-7695-8765-4
24. Петров, А.П. Трехмерные модели транспортных потоков в мегаполисах / А.П. Петров, И.С. Иванов // Транспортные системы и технологии. — 2021. — Т. 7, № 2. — С. 45–60.

25. Погребняк, М. А. Моделирование движения транспортных потоков: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Максим Анатольевич Погребняк. — Ярославль: Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова, 2024. — 133 с.
26. Семенов В. В. Моделирование транспортных потоков: методы и алгоритмы [Электронный ресурс]. — 2013. — URL: <https://spkurdyumov.ru/uploads/2013/08/Semenov.pdf>.
27. Статистические данные о транспортных потоках Московской кольцевой автодороги за 2022 год / Департамент транспорта г. Москвы. — М., 2023. — 67 с.
28. Транспортный комплекс Москвы. Итоги работы за 2022 год / Правительство Москвы, Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы. - Москва, 2023. - 156 с.
29. Трегуб, В. В., Соколов, В. Н. Математическое моделирование транспортных систем / В. В. Трегуб, В. Н. Соколов. — СПб.: Политехника, 2017. — 410 с.
30. Чумаченко, Е. А. Методы моделирования дорожного движения в условиях городской застройки / Е. А. Чумаченко. — М.: Инфра-М, 2020. — 298 с.