

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра управления автомобильными перевозками  
и дорожным движением**

# **ОПТИМИЗАЦИЯ В ДОРОЖНОМ ДВИЖЕНИИ**

**Гомель 2021**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра управления автомобильными перевозками  
и дорожным движением

# ОПТИМИЗАЦИЯ В ДОРОЖНОМ ДВИЖЕНИИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности для обучающихся  
по специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»  
в качестве учебно-методического пособия*

Гомель 2021

УДК 756.11(075.8)  
ББК 39.38  
О-62

А в т о р ы: В. Н. Галушко, С. А. Аземша, Д. В. Капский, Е. Н. Кот,  
И. Н. Кравченя

Р е ц е н з е н т ы: заведующий кафедрой транспортных систем и технологий  
канд. техн. наук, доцент *С. А. Рынкевич* (БНТУ);  
доцент кафедры транспортных систем и технологий канд.  
техн. наук, доцент *А. Я. Андреев* (БНТУ)

**Оптимизация в дорожном движении** : учеб.-метод. пособие /  
О-62 В. Н. Галушко [и др.] ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь,  
Белорус. гос. ун-т трансп.– Гомель : БелГУТ, 2021. – 185 с.  
ISBN 978-985-6550-99-0

Представленный материал позволит сформировать знания по транспортному моделированию и его применению, ознакомит с возможностями современных компьютерных программ, применяемых для транспортного моделирования, а также с геоинформационными системами и их применением для повышения безопасности дорожного движения.

Предназначено для студентов и магистрантов соответствующего профиля, а также для работников, чья деятельность связана с дорожным движением.

**УДК 756.11(075.8)**  
**ББК 39.38**

**ISBN 978-985-6550-99-0**

© Оформление. БелГУТ, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	5
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА</b> .....	7
1.1 Основные сведения.....	7
1.2 Прогнозные модели.....	8
1.2.1 Модели, основанные на расчете матрицы межрайонных корреспонденций.....	8
1.2.2 Статические и динамические модели.....	9
1.2.3 Модели равновесного распределения потоков.....	9
1.2.4 Модель оптимальных стратегий.....	10
1.3 Имитационные модели.....	11
1.3.1 Общие сведения об имитационном транспортном моделировании.....	11
1.3.2 Макроскопические имитационные модели.....	14
1.3.3 Кинетические имитационные модели (мезомодели).....	19
1.3.4 Микроскопические имитационные модели.....	19
<b>2 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	24
2.1 Основные задачи транспортного моделирования.....	24
2.2 Transyt.....	25
2.3 ArteryLite.....	28
2.4 Paramics.....	30
2.5 VISSIM.....	33
2.6 LISA+.....	35
2.7 VISUM.....	37
2.8 Дорожный менеджер.....	38
2.9 AnyLogic.....	40
2.10 Светофор, DeskTran, Dracula, AIMSUN.....	42
2.11 Сравнительный анализ возможностей современных программных средств транспортного моделирования.....	45
2.12 Геоинформационные системы анализа дорожной аварийности.....	48
<b>3 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	55
3.1 Основы математической статистики.....	55
3.1.1 Отбор информации.....	56
3.1.2 Требования к точечным оценкам и объему выборок.....	59
3.1.3 Проверка статистических гипотез.....	62
3.1.4 Точность оценки. Доверительный интервал.....	65
3.2 Основы многомерного статистического анализа.....	65
3.2.1 Классификация задач многомерного статистического анализа.....	65
3.2.2 Регрессионный анализ.....	67
3.2.3 Корреляционный анализ.....	72
3.2.4 Дисперсионный анализ.....	74
3.2.5 Статистическая проверка адекватности математических моделей.....	79

<b>4 ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВАРИАНТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО</b>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЯ.....</b>	<b>86</b>
4.1 Методы векторной оптимизации сложных систем.....	87
4.2 Оптимизация нелинейной функции отклика от одной переменной.....	90
4.3 Максимизация функции отклика от многих переменных.....	94
4.4 Нахождение экстремума функции отклика от многих переменных при наличии ограничений.....	99
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Статистическое прогнозирование аварийности.....	<b>101</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> Моделирование дорожного движения с использованием Transyt-7FR.....	<b>114</b>
Б.1 Общая характеристика программы.....	114
Б.2 Исходные данные.....	116
Б.3 Последовательность расчета одного перекрестка.....	122
Б.4 Последовательность расчета двух связанных перекрестков.....	159
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>178</b>

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ – автоматизированная система управления  
АСУДД – автоматизированная система управления дорожным движением  
БДД – безопасность дорожного движения  
ГИС – географическая информационная система  
ГПТ – городской пассажирский транспорт  
ДД – дорожное движение  
ДТС – дорожно-транспортная ситуация  
ДТП – дорожно-транспортное происшествие  
ДС – дорожная сеть  
ИМ – имитационная модель  
ИТС – интеллектуальная транспортная система  
КА – клеточные автоматы  
МТС – маршрутное транспортное средство  
ОП – остановочный пункт  
САПР – система автоматизированного проектирования  
СВ – случайная величина  
ТМ – транспортное моделирование  
ТС – транспортное средство  
ТП – транспортный поток

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во многих крупных городах исчерпаны или близки к исчерпанию возможности экстенсивного развития транспортных сетей. Поэтому особую актуальность приобретает правильное планирование структуры ДС и ее параметров, улучшение организации ДД, рационализация системы маршрутов ГПТ и другие оптимизационные процессы.

Современный опыт организации жизненного пространства крупных городов предлагает достаточно большой набор действий для решения транспортных проблем:

- совершенствование технико-эксплуатационных показателей отдельных элементов ДС, систем управления ДД и ГПТ;

- строительство многоярусных паркингов при одновременной ликвидации неорганизованной стоянки ТС на проезжей части;

- сокращение зон тяготения ТП за счет ограничения и/или запрещения строительства объектов производственной, финансово-деловой, торгово-обслуживающей и культурной направленности на территориях со сложившейся застройкой и ограниченными возможностями транспортной инфраструктуры;

- вывод на городскую периферию и/или за пределы города крупных предприятий и организаций;

- создание препятствий для использования ДС в перегруженных транзитными ТП районах города путем введения особых режимов движения (запрет остановки и стоянки, создание пешеходных зон т. п.);

- введение различного рода ограничений на въезд в центральную часть города (запрет на проезд индивидуальных ТС, ограничение въезда ТС отдельных типов, организация платного въезда и т. п.).

Для эффективной реализации перечисленных действий необходима их предварительная разносторонняя расчетная оценка, для эффективного выполнения которой современным инструментом является транспортное моделирование. Полноценное использование средств ТМ позволяет выбрать варианты, обеспечивающие повышение пропускной способности участка ДС (транспортного узла, магистрали, района и т. п.) и / или БДД.

В пособии приведен перечень мероприятий по совершенствованию дорожных условий (приложение А) и рассмотрено применение программы

моделирования дорожного движения Transyt-7FR, позволяющей максимизировать пропускную способность участка ДС (приложение Б).

## **1 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

### **1.1 Основные сведения**

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) являются местом соприкосновения автомобильной промышленности и индустрии информационных технологий и базируются на двух аспектах: моделировании транспортных систем и регулировании движения транспортных потоков.

Определение интеллектуальных транспортных систем дает представление о главных целях: информативность, безопасность, качественно новый уровень информационного взаимодействия участников ДД.

Объектом управления для ИТС являются транспортные потоки. Теория транспортных потоков как наука получила свое развитие на стыке различных областей знаний: физики, математики, экономики, исследований операционных систем и т. п. К настоящему времени накоплен обширный практический опыт описания транспортных систем и поведения участников движения. Однако общий уровень исследований и их практическое использование всё еще остаются ограниченными по нескольким причинам:

- нестабильности и многообразия форм ТП;
- трудности получения всеобъемлющей и объективной информации о ТП;
- противоречивости критериев качества управления ДД, когда, с одной стороны, необходимо обеспечивать бесперебойность и высокую скорость сообщений, а с другой – сокращать ущерб, наносимый транспортной системой, в том числе путем ограничения скоростей и направлений движения;
- неточности исполнения решений по управлению ДД, что обусловлено большим количеством участников движения с индивидуальными характеристиками и стилем поведения, а также непредсказуемостью

дорожных условий из-за внешних (например, погодных) и внутренних факторов.

Следствием трудности математического описания ТП является определенный дисбаланс между результатами научных исследований и математическими расчетами, с одной стороны, и практически наблюдаемыми результатами – с другой. При этом применяются различные подходы к математическому моделированию и большое количество программных продуктов моделирования ТП.

Любая АСУ собирает информацию об объекте управления, анализирует ее и оказывает на этот объект прямое или косвенное управляющее воздействие. Для анализа информации об объекте управления необходимо заложить в систему некое представление об этом объекте.

Традиционно выделяют две группы математических моделей транспортного потока: прогнозные и имитационные.

Если известна топология дорожной сети, ее геометрические характеристики и потокообразующие объекты, то можно с высокой точностью определить, какими будут транспортные потоки и загрузка данной сети. В частности, можно определить ряд усредненных характеристик движения: объемы межрайонных перемещений, интенсивность ТП, количество автомобилей и пассажиров на различных участках сети и т. п. Для решения таких задач применяют *прогнозные модели*.

Целью *имитационных моделей* является более детальное рассмотрение транспортного потока, включая его изменение во времени. При этом входными данными являются усредненные характеристики (средняя скорость, средний объем передвижений, распределение по путям и др.).

В подразделе 1.2 приведена классификация прогнозных и имитационных моделей, рассмотрен основной математический аппарат в их описании и недостатки, основанные на анализе данных литературных источников [1–57].

## **1.2 Прогнозные модели**

Область применения: поддержка решений в области планирования развития города, анализ последствий изменений в организации ДД, выборе альтернативных проектов развития дорожной сети и т. п.

### **1.2.1 Модели, основанные на расчете матриц межрайонных корреспонденций**

Одной из основных математических моделей для оценки межрайонных корреспонденций является *гравитационная модель*. Применительно к транспортной системе в качестве тел выступают пункты, которые создают или поглощают ТП. Основная идея заключается в том, что корреспонденция из одной зоны в другую пропорциональна общему объему отправок-

прибытий и некоторой функции, зависящей от дальности поездки между центрами этих зон.

Задача *энтропийной модели* заключается в вероятностном описании поведения пользователей транспортной сети, которые случайным образом распределяются по некоторому набору возможных состояний. Такое распределение приводит к определенному макроскопическому состоянию системы. Состояние, которое реализуется в реальности, есть состояние с наибольшим статистическим весом (его также часто называют наиболее вероятным состоянием).

### 1.2.2 Статические и динамические модели

Одним из наиболее простых способов распределения корреспонденции по сети является наложение каждой из корреспонденций на единственный оптимальный маршрут, соединяющий два района. Однако этот способ не учитывает двух важных факторов, влияющих на выбор оптимального маршрута:

- 1) выбор, сделанный одними участниками ДД, косвенно влияет на выбор других участников;
- 2) выбор пассажиром ГПТ конкретного маршрута, на который влияет время и стоимость доставки.

Модель относят к классу *статических*, если для ее реализации необходимые параметры берутся за определенный промежуток времени и усредняются. Если динамика изменения корреспонденции достаточно высока, а сами маршруты достаточно длинные, то следует учитывать, что все участники загружают избранные маршруты в разное время.

### 1.2.3 Модели равновесного распределения потоков

Модели равновесного распределения потоков являются наиболее эффективными моделями, учитывающими взаимное влияние пользователей сети друг на друга. Эти прогнозные модели, в свою очередь, подразделяются еще на несколько подвидов: статические, многопользовательского равновесия, переменного спроса на ТП, стохастические и динамические.

**Статические модели равновесного распределения потоков** предполагают, что все пользователи выбирают маршрут с наименьшими обобщенными затратами в пути. В результате такого выбора складывается интенсивность движения на всех элементах сети. В свою очередь, интенсивность влияет на индивидуальный выбор оптимального пути каждым из участников.

**Модели многопользовательского равновесия** можно отнести к «расширению» модели равновесного распределения, которое позволяет рассчитать распределение потоков для системы с несколькими классами

пользователей. Пользователей относят к разным классам, если обобщенная цена одних и тех же элементов сети для них различна. Предполагается, что для каждого класса уже вычислена своя матрица корреспонденций. При этом распределение пользователей одного класса зависит от распределения другого класса.

Под обобщенной ценой понимается критерий, на основании которого оценивается влияние факторов различной природы на выбор путей передвижения. В общем случае она состоит из следующих составляющих: времени передвижения, которое может включать дополнительные задержки на различных элементах дорожной сети (время парковки, время ожидания и др.); денежных затрат (платные магистрали, плата за въезд в определенные зоны города и др.); условных штрафных добавок времени.

**Модели переменного спроса на ТП.** Модели равновесного распределения с переменным спросом на поток позволяют в рамках единого алгоритма вычислить как само распределение, так и корреспонденции.

На практике эта модель не является эффективной. Она работает только с одним вариантом загрузки сети, и поэтому объемы корреспонденции представляются однородными величинами. В реальности же загрузка не является постоянной, а меняется в зависимости от ряда параметров (например, времени суток или сезона года), что в свою очередь влияет на формирование корреспонденций, которые также весьма неоднородны по составу.

**Стохастические модели равновесного распределения потоков.** Рассмотренные ранее модели имеют в своей основе предположение, что пользователи имеют точное представление обо всей сети и принимают точные решения о выборе своих маршрутов. Однако на самом деле в поведении пользователей всегда присутствует элемент случайности. Для учета таких случайностей была предложена *модель стохастического равновесного распределения*. Основная ее идея состоит в том, что для каждого пользователя различают фактическую и предполагаемую цену пути. Условие стохастического равновесия формулируется следующим образом: ни один из участников движения не предполагает, что может уменьшить свою индивидуальную обобщенную цену поездки при изменении маршрута.

**Динамические модели равновесного распределения потоков** работают в режиме «реального времени», относятся к классу *динамических* [85]. Дополнительным параметром для таких моделей выступает время, что существенно усложняет решение задачи. Чтобы отслеживать время передвижения, необходимо детальное уточнение характеристик движения, то есть необходимо применение имитационного моделирования транспортных и пешеходных потоков.

### 1.2.4 Модель оптимальных стратегий

**Моделью оптимальных стратегий** называют модель, которая рассчитывает загрузку ДС и основывается на стратегиях поведения пользователей ГПТ. Если пользователь ДС может достаточно точно рассчитать оптимальный для себя путь, то пользователь ГПТ во многом зависит от случайных обстоятельств. Он может лишь предполагать стратегию своего поведения и приблизительный маршрут, который может быть скорректирован в ходе передвижения. Стандартная модель оптимальных стратегий исходит из двух условий:

1) на этапе выбора стратегии фиксируется некоторый набор возможных продолжений пути для каждого узла, в котором может оказаться пассажир в процессе движения;

2) оказываясь в очередном узле, пользователь выберет то продолжение, которое первое предоставит ему возможность обслуживания.

Естественно, все пути реализуются с разными вероятностями, так как прибытие и отправление МТС в общем случае рассматривается как случайное. Таким образом, модель оптимальных стратегий является *стохастической*.

## 1.3 Имитационные модели

### 1.3.1 Общие сведения об транспортном имитационном моделировании

**Имитационное моделирование** – метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение (с помощью компьютерной программы) процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера [58].

Так, в процессе имитации динамики функционирования системы ГПТ [59] с помощью генератора случайных чисел разыгрываются, например, моменты наступления сигналов светофоров, появления ТС, пассажиров, МТС на линии (рисунок 1.1). В процессе имитации отслеживаются и фиксируются определенные события и состояния системы (время ожидания пассажирами прибытия МТС, время передвижения, наполнение подвижного состава и др.), по которым оцениваются показатели качества функционирования системы.

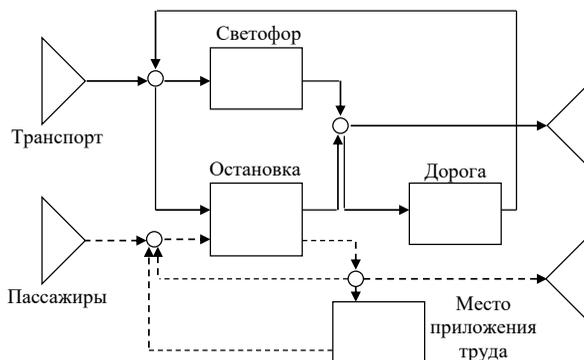


Рисунок 1.1 – Схема процессов в системе ГПТ

К имитационному моделированию прибегают, когда:

- дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте;
- невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время, причинные связи, последствие, нелинейности, случайные переменные;
- необходимо выполнить имитацию поведения системы во времени.

В основе имитационного моделирования лежит метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), который сводится к розыгрышу случайных событий. Элементарным примером такого розыгрыша может служить выбор одного из двух исходов с помощью «подбрасывания монетки» [58]. Метод Монте-Карло включает в себя три этапа: получение случайного числа  $R$ , отождествление его с определенной вероятностью и розыгрыш единичного жребия.

Случайное число  $R$  – значение случайной величины, равномерно распределенной на интервале  $[0, 1]$ . Такое случайное число можно получить с помощью рулетки, размеченной, например, простыми десятичными дробями (отсюда и название метода Монте-Карло). Существуют специальные программы – «датчики случайных чисел», которые позволяют при каждом обращении к программе получить «псевдослучайное число» (случайную величину, распределенную почти равномерно на интервале  $[0, 1]$  и принимающую конечное множество значений).

Случайное число ставят в соответствие вероятности рассматриваемого события, которая принимает значения в интервале  $[0, 1]$ .

В теории вероятностей условились называть жребием любой опыт со случайным исходом, который отвечает на один из следующих вопросов:

- «произошло» или «не произошло» определенное событие  $A$ ;
- какое событие из полной группы несовместных событий  $\{A, B, \dots, C\}$  «произошло»;
- какое значение «приобрела» случайная величина.

Для ответа на *первый вопрос* единичного жребия необходимо знать вероятность события  $A$ :  $p$ . Тогда, если разыгранное случайное число  $R < p$ , то считают, что событие  $A$  «произошло», если  $R > p$ , то событие «не произошло» (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Геометрическая интерпретация розыгрыша события  $A$

*Полная группа событий* – это такая группа событий, кроме которых никаких других событий произойти не может. *Несовместные события* не происходят одновременно. Таким образом, полная группа несовместных событий  $\{A, B, \dots, C\}$  имеет сумму вероятностей, равную единице. Иначе говоря, на интервале  $[0, 1]$  можно выделить последовательность непересекающихся подинтервалов длиной, равной вероятностям этих событий  $p(A), p(B), \dots, p(C)$ . Тогда ответ на *второй вопрос* единичного жребия (какое из событий «произошло») дают по тому факту, на какой из подинтервалов попало случайное число  $R$  (рисунок 1.3).

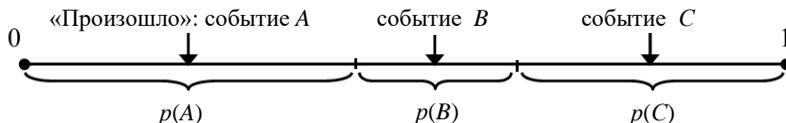


Рисунок 1.3 – Геометрическая интерпретация розыгрыша событий  $A, B, C$

В третьем случае, если случайная величина дискретна, то процедура сводится к предыдущей.

Непрерывная случайная величина, как известно, задается законом распределения в виде интегральной функции распределения  $F(x) = P(\xi < x)$ , т. е. вероятности того, что случайная величина  $\xi$  примет значение, не превосходящее  $x$ . Эта функция по своему смыслу является монотонно возрастающей от 0 до 1 при изменении  $\xi$  от нижней до верхней границы области возможных значений. В силу монотонности эту функцию можно обратить однозначно: по заданному значению  $F(x)$  определить единственное значение  $x$ , ему соответствующее. Тогда случайное число  $R$  рассматривают как значение вероятности  $F(x)$  и по нему находят значение  $x$  (рисунок 1.4).

$$F(x) = P(\xi < x)$$

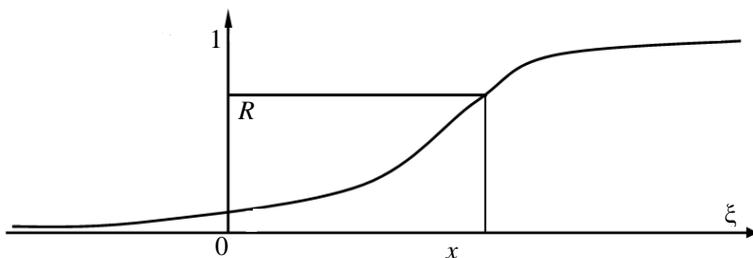


Рисунок 1.4 – Применение интегральной функции распределения

Многokrатно воспроизводя процесс функционирования имитационной модели с помощью «аппарата» розыгрыша единичного жребия, нетрудно построить цепочку жребиев для реализации случайного явления любой сложности и собрать статистический материал, достаточный для оценки интересующих показателей надежности системы с заданной точностью. Такой подход исследования называется статистическим моделированием.

Особенностью имитационных моделей с законами распределения случайных величин, получаемых из наблюдения за оригиналом, является то, что вопрос о проверке адекватности отпадает.

*Ограничения имитационного моделирования на компьютере:*

- не предоставляется непосредственное решение задачи (как при использовании аналитических методов);

- результаты имитационного моделирования зачастую носят вероятностный характер и требуют применения многочисленных методов статистического анализа данных;

- имитационная модель, как любая компьютерная программа, требует *верификации* – проверки соответствия фактического алгоритма функционирования имитационной модели замыслу исследования;

- задача *проверки адекватности* стоит наиболее остро, что связано с вероятностным характером результатов моделирования.

Имитационные модели ставят своей задачей математическое описание поведения пользователей транспортной сети и оценку тех или иных характеристик и параметров движения [86].

Область применения: улучшение организации ДД, оптимизация светофорных циклов, создание систем координированного светофорного регулирования («зеленая волна») и т. п.

В группе транспортных имитационных моделей можно условно выделить три класса:

- 1) макроскопические;
- 2) кинетические (мезомодели);
- 3) микроскопические.

### 1.3.2 Макроскопические имитационные модели

Модели, относящиеся к макроскопическим, описывают ТП как «единое целое» в терминах усредненных характеристик (плотность потока, средняя скорость и др.). ТП в таких моделях рассматривается аналогичным потоку жидкости, поэтому макроскопические модели также называют *гидродинамическими*. Макроскопические модели имеют существенные недостатки, так как они **не учитывают** в расчетах размеры отдельных автомобилей. Например, при некоторых значениях параметров эти модели могут давать плотности, превышающие максимально допустимые (движение «бампер к бамперу»).

Макроскопические модели позволяют моделировать процессы передвижения населения и грузов по городу с выбором путей следования и видов транспорта. Они предназначены для оценок ТП при изменении ДС, а также потокообразующих и потокопоглощающих объектов на территории города. В связи с этим основная область их применения – поддержка управленческих решений в области планирования развития городских территорий, анализ последствий изменений в организации движения, выбор альтернативных проектов развития дорожной сети и т. п.

Рассмотрим разновидности макроскопических имитационных моделей.

**LWR-модель.** Первой моделью, использующей гидродинамическую аналогию, была модель Лайтхилла – Уизема – Ричардса (LWR-модель). В ней предполагается, что:

– существует взаимно-однозначная связь между скоростью и плотностью ТП: допускается, что средняя скорость является убывающей функцией плотности;

– количество ТС на дороге принимается неизменным и постоянным.

Хотя первоначальная LWR-модель представляется достаточно упрощенной, именно простота реализации дает возможность использовать эту модель в качестве вспомогательного инструмента при моделировании загрузки больших транспортных сетей. Тем не менее у этой модели есть существенный недостаток: первое условие предполагает, что средняя скорость движения в любой момент времени соответствует равновесному значению при данной плотности потока. В связи с этим модель некорректно отображает ситуацию в неравновесных состояниях.

Обозначим через  $\rho(x, t)$  – плотность ТП, а  $v(x, t)$  – средняя скорость ТС в точке дороги с координатой  $x$  в момент времени  $t$ . Эти величины связаны уравнением непрерывности, выражающим закон сохранения количества ТС на дороге:

$$\partial_t \rho + \partial_x (\rho v) = 0. \quad (1.1)$$

Предполагается, что средняя скорость является детерминированной (убывающей) функцией плотности:

$$v(x, t) = v_e(\rho(x, t)). \quad (1.2)$$

Наиболее существенным недостатком модели является соотношение (1.2), которое предполагает, что средняя скорость ТП  $v(x, t)$  в каждый момент времени соответствует равновесному значению  $v_e$  при данной плотности ТС. Поэтому данная модель не адекватна реальности при описании неравновесных ситуаций, возникающих вблизи неоднородностей дорожной сети (перекрестки, съезды и выезды, сужения), а также в условиях, так называемого «stop-and-go» [1, 2] движения, возникающего при заторах.

Для описания неравновесных ситуаций вместо детерминированного соотношения (1.2) было предложено использовать дифференциальное уравнение для моделирования динамики средней скорости. Уравнение скорости имело вид

$$\partial_t v + v \partial_x v = -\frac{C(\rho)}{\rho} \partial_x \rho + \frac{1}{\tau} (v_e(\rho) - v), \quad (1.3)$$

где  $C(\rho) = -\frac{1}{2\tau} \frac{dv_e}{d\rho}$ .

Слагаемое  $v \partial_x v$  описывает изменение скорости в данном месте дороги за счет кинематического переноса автомобилей из предшествующего сегмента дороги в данную точку со средней скоростью потока.

Первое слагаемое в правой части  $\left(-\frac{C(\rho)}{\rho} \partial_x \rho\right)$  описывает реакцию водителей (торможение или ускорение) на изменение ситуации впереди.

Слагаемое в правой части уравнения  $(v_e(\rho) - v) / \tau$  описывает тенденцию приближения средней скорости  $v$  к равновесному при данной плотности значению  $v_e(\rho)$ ;  $\tau$  – характерное *время релаксации* (период, за который амплитудное значение возмущения в выведенной из равновесия системе уменьшается в  $e$  раз).

Было предложено много различных модификаций уравнения скорости, а также численного метода для его решения [3–8].

**Модель Пэйна.** Пусть ТС в однополосном потоке пронумерованы слева направо. Обозначим через  $s_n(t)$  – координату центра  $n$ -го ТС в момент времени  $t \geq 0$ . Положим

$$h_n(t) = s_{n+1}(t) - s_n(t), \quad v_n(t) = s'_n(t).$$

Для каждого водителя существует «безопасная» скорость движения, зависящая от дистанции до лидера

$$s'_n(t + t_p) \left( v_n(t + t_p) \right) = v \left( \frac{1}{h_n(t)} \right), \quad v'(\rho) < 0,$$

где  $t_p$  – время, характеризующее реакцию водителей.

Введем функции двух переменных

$$h(t, x), \rho(t, x) = \frac{1}{h_n(t)}, v(t, x),$$

задаваясь их значениями в полуплоскости  $t \geq 0$  на счетном наборе кривых, по формуле

$$h\left(t, \frac{s_n(t) + s_{n+1}(t)}{2}\right) = h_n(t), \quad v(t, s_n(t)) = v_n(t).$$

Считая  $h_n(t)$  и  $\tau$  малыми величинами и учитывая, что

$$v\left(t + t_p, s_n(t + t_p)\right) = v\left(\rho\left(t, s_n(t) + \frac{1}{2h_n(t)}\right)\right),$$

$$\frac{d}{dt} h\left(t, s_n(t) + \frac{1}{2h_n(t)}\right) = v(t, s_{n+1}(t)) - v(t, s_n(t)),$$

получим

$$v(t, s_n(t)) + v_t(t, s_n(t)) + v(t, s_n(t))v_x(t, s_n(t))t_p =$$

$$= v\left(\rho(t, s_n(t)) + v'\rho(t, s_n(t))\right) + 0,5\rho_x(t, s_n(t))h(t, s_n(t)),$$

$$h_t(t, s_n(t)) + v(t, s_n(t))h_x(t, s_n(t)) = v_x(t, s_n(t))h(t, s_n(t)).$$

Умножая второе уравнение на  $\rho^2$  и опуская у функций аргументы (продолжая «по непрерывности»  $\rho(t, x)$  и  $v(t, x)$  с счетного набора близких кривых на полуплоскость  $t \geq 0$ ), приходим к системе

$$v + (v_t + vv_x)t_p = v(\rho) + v'(\rho) / 2\rho \cdot \rho_x.$$

Таким образом, мы получили модель Пэйна [87]. Ее можно понимать как своеобразный закон сохранения, в котором уже не предполагается, что скорость зависит от плотности, и для нее записывается уравнение

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0.$$

Одним из наиболее существенных недостатков уравнения Пэйна является то, что решение  $\rho(x, t) \equiv \rho_0, v(t, x) \equiv v(\rho_0)$  устойчиво в линейном приближении к малым возмущениям при всех значениях плотности. Однако анализ эмпирических данных показывает, что при высоких значениях плотности движение ТП становится неустойчивым. Малые возмущения приводят к возникновению заторов, или волн «*stop-and-go*» (при большом скоплении ТС движение потока приобретает прерывистый характер). На этой стадии (волны «*stop-and-go*») ТП можно уподобить потоку замерзающей воды, а автомобили становятся на какой-то промежуток времени «приклеенными» к данному участку ДС). Эта проблема может быть преодолена следующим изменением уравнения:

$$C(\rho) = \frac{d}{d\rho} P_e(\rho), \quad P_e(\rho) = \rho \Theta_c(\rho), \quad (1.4)$$

где  $P$  – «давление» ТП, выраженное через изменение скоростей в ТП $\Theta$ . Уравнение скорости при такой замене, согласно [9, 10] приобретает вид

$$\partial_t v + v \partial_x v = -\frac{1}{\rho} \partial_x P_e + \frac{1}{\tau} (v_e(\rho) - v). \quad (1.5)$$

Согласно уравнению (1.5) автомобили замедляют свое движение, если давление потока впереди возрастает, и ускоряют в противном случае. Предполагается, что вариация скоростей  $\Theta$  зависит от плотности ТП.

Уравнение (1.5) предсказывает возникновение ударных волн. Для сглаживания и предотвращения разрывов решений в правую часть уравнения добавляется слагаемое вида  $v \partial_{xx}^2 v$ , аналогичное слагаемому, описывающему вязкость в уравнениях классической гидродинамики. Окончательно уравнение скоростей приобретает вид

$$\partial_t v + v \partial_x v = -\frac{\Theta_0}{\rho} \partial_x p + v \partial_{xx}^2 v + \frac{1}{\tau} (v_e(\rho) - v). \quad (1.6)$$

Анализ устойчивости решения данного уравнения показывает, что при значениях плотности, превышающих некоторое критическое значение  $\rho_{кр}$ , решение становится неустойчивым к малым возмущениям (область неустойчивости). Это свойство позволяет моделировать возникновение *фантомных заторов* – режимов «*stop-and-go*» в однородном потоке, возникающих в результате малых случайных возмущений.

Наиболее известной в рассматриваемом классе является модель *КК* (Кернера – Конхойзера) [13], которая предполагает уравнение

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\tau} (V(\rho) - v) - c_0^2 \frac{\partial L(\rho)}{\partial x} + \frac{\mu \partial^2 v}{\rho \partial x^2}. \quad (1.7)$$

Правая часть (1.7) содержит три коэффициента, касающихся скорости ТП. Первое слагаемое отражает тенденцию потока на заданной плотности  $\rho$  к понижению средней скорости до некоторой естественной величины. При малых плотностях эта скорость определяется дорожными условиями и ограничениями по скорости движения и слабо зависит от  $\rho$ . При высоких плотностях  $V(\rho)$  приближается к нулю. При средних плотностях она быстро падает и это обусловлено тем фактом, что при высокой плотности потока водителям сложно совершить обгон. Предполагается, что  $V(\rho)$  будет убывающей функцией с малой производной при больших и малых  $\rho$ .

Второе слагаемое – *фактор упреждения*, который означает, что водители снижают скорость, если впереди ТП имеет более высокую плотность. Безразмерная функция  $L(\rho)$  должна в таком случае быть монотонно возрастающей. Ее обычно полагают равной  $\ln \rho$ , а величина  $c_0^2 \rho$  играет роль давления.

Последний член – «вязкость» или «диффузия», отражает тенденцию согласования скорости движения со скоростью окружающих автомобилей в

потоке.

На основе компьютерных расчетов этой модели был изучен процесс образования и развития *кластеров* – областей с высокой плотностью и низкой скоростью ТП.

Все рассмотренные модели не свободны от некоторых недостатков. Например, при некоторых значениях параметров эти модели могут предсказывать плотности ТП, превышающие максимально допустимые («бампер к бамперу»). Кроме того, могут возникать отрицательные значения скоростей (затор «рассасывается назад» как результат действия вязкости) [18, 19, 20].

**Модель Танака.** Один из способов определения зависимости в фундаментальной диаграмме – модель Танака (1963) [88]. В этой модели рассматривается поток ТС, движущийся только по одной полосе в каждом из направлений движения. Положим, что скорость ТС не превышает  $v_{\max}$ . Плотность можно описать уравнением

$$\rho(v) = \frac{1}{d(v)},$$

где  $d(v) = L + t_p v + c_T v$  – среднее расстояние между ТС для определённой скорости потока,  $L$  – средняя длина ТС;  $t_p$  – время реакции водителей;  $c_T$  – коэффициент, зависящий от тормозного пути.

В целом коэффициент  $c_T$  зависит от состояния дорожного покрытия и погодных условий. Из зависимости  $d(v)$  можно получить зависимость  $v(\rho)$ , удовлетворяющую условиям модели LWR.

**Модель Уизема.** Дж. Уизем предложил в работе [89] учесть так называемую дальность зрения водителей:

$$v(t, x) = v(\rho(t, x)) - \frac{D(\rho(t, x)) \partial \rho(t, x)}{\rho(t, x) \partial x}, \quad D(\rho) > 0.$$

Это можно интерпретировать следующим образом: при увеличении плотности потока впереди водители уменьшают скорость, а при уменьшении плотности – увеличивают.

### 1.3.3 Кинетические имитационные модели (мезомодели)

Исследователи И. Пригожин и Р. Херман предложили описывать ТП кинетическим уравнением (типа уравнения Больцмана для распределения частиц газа, только для ТС [90]). Из кинетических моделей ТП (в том числе и многополосных) можно получать макроскопические (гидродинамические) модели подобно тому, как в кинетической теории получаются уравнения газовой динамики (гидродинамики) – с помощью умножения на различные функции от скорости и последующего интегрирования по скоростям

кинетического уравнения для плотности в расширенном (на скорости) фазовом пространстве  $(t; x; v)$ .

Уравнение Пригожина – Больцмана для ТП имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}\right) f(x, v, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel}.$$

Левая часть уравнения – это хорошо известный оператор потока, примененный к функции распределения функции от одного ТС. Правая часть – формула Пригожина, включающая в себя два процесса: непрерывное изменение скорости из-за ускорений к желаемой скорости (показательный процесс расслабления); дискретное изменение скорости из-за взаимодействий более быстрых ТС с более медленными (дискретный процесс замедления).

Таким образом, мезомодели учитывают особенности поведения водителей и при этом рассматривают ТП, не прибегая к моделированию отдельно взятых машин.

### 1.3.4 Микроскопические имитационные модели

Микроскопические модели явно описывают движение каждого автомобиля в ТП. Такой подход позволяет достичь гораздо более точных результатов в моделировании по сравнению с макроскопическим подходом усреднения [91]. Тем не менее микроскопическое моделирование на практике требует очень больших вычислительных ресурсов.

Рассмотрим некоторые разновидности микроскопических ИМ.

**Модель следования за лидером.** Суть теоретических положений этой модели заключается в следующем: при следовании двух автомобилей друг за другом на достаточно близком расстоянии, когда происходит их взаимное влияние, ускорение заднего автомобиля прямо пропорционально разности скоростей переднего и заднего автомобилей (относительной скорости). Дифференциальное уравнение теории «следования за лидером» имеет вид

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{1(v_{k+1} - v_k)}{t_p},$$

где  $v_k, v_{k+1}$  – соответственно скорость заднего и переднего автомобилей;

$\frac{dv_k}{dt}$  – ускорение заднего ТС;  $t_p$  – время реакции водителя.

В общем виде теория «следования за лидером» выражается следующим уравнением:

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{av_k^m(v_{k+1} - v_k)}{s^l},$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности;

$s$  – расстояние между ТС;

$m, l$  – коэффициенты пропорциональности.

Одним из явных недостатков модели следования за лидером является то, что она неправильно описывает поведение единственного автомобиля на дороге. Согласно данной модели в отсутствие лидера ускорение автомобиля будет равно нулю, что может быть верным в частных случаях. Естественно предположить, что в реальных условиях водитель ТС постарается увеличить (или уменьшить) свою скорость до желаемой.

В настоящее время модель следования за лидером используется в программном пакете MITSIM. Более подробный обзор вариантов модели и описание предмета содержится в [42].

**Модель оптимальной скорости Ньюэлла.** Модели оптимальной скорости исходят из предположения, что для каждого автомобиля существует своя «безопасная» скорость движения, которая тем не менее тоже зависит от скорости лидера [91]. Однако адаптация уже происходит не к скорости лидера, а к оптимальной скорости. Влияние лидера косвенно выражено через зависимость оптимальной скорости от дистанции до лидера. Такая модель впервые предложена в [43], где предполагалась адаптация скорости с запаздыванием по времени:

$$v_n(t + \Delta t) = v_e'(d_n(t)) = v_e(s_n(t)). \quad (1.8)$$

В [44, 45] предложено использование дифференциального уравнения

$$\frac{\partial v_n}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (v_e'(d_n(t)) - v_n(t)),$$

где оптимальная скорость задается выражением

$$v_e'(d) = \frac{v_0}{2} (\tanh(d - d_c) + \tanh d_c)$$

с подходящими константами  $v_0$  или  $d_c$ . Данное уравнение может быть получено разложением (1.8) в ряд Тейлора до членов первого порядка по  $\tau = \Delta t$ :

$$v_n(t + \Delta t) \approx v_n(t) + \Delta t \frac{\partial v_n}{\partial t}.$$

Можно показать, что малое возмущение в модели оптимальной скорости приводит к развитию затора, если выполнено условие неустойчивости

$$\frac{dv_e'(d_n)}{dd_n} = dv_e(s_n) ds_n \text{ и } dv_e(s_n) ds_n > \frac{1}{2\tau}.$$

При больших значениях  $\tau$  в модели начинают происходить столкновения автомобилей, в то время как при слишком малых значениях возникают нереалистично большие ускорения. Сходные результаты получены в [46, 47] для аналогичных моделей с дополнительным запаздыванием реакции по времени  $\Delta t$ .

**Модель «умного водителя» Трайбера.** Для того чтобы устранить описанные выше недостатки, была предложена модель «разумного водителя».

Различные эксперименты показали, что данная модель устойчива к вариациям параметров и отображает достаточно реалистичную картину поведения водителей и свойств ТП.

В модели «умного водителя» [91] предполагается, что ускорение автомобиля является непрерывной функцией скорости  $v_n$ , чистой дистанции до лидера  $s_n = d_n - l_{n-1}$  и скорости относительно лидера  $\Delta v_n$ :

$$v_n' = a_n \left[ 1 - \left( \frac{v_n}{v_n^0} \right)^\delta - \left( \frac{s_n^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right]. \quad (1.9)$$

Компонент  $\left( \frac{v_n}{v_n^0} \right)^\delta$  в правой части уравнения (1.9) описывает динамику ускорения автомобиля на свободной дороге, в то время как компонент  $\left( \frac{s_n^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2$  описывает торможение, связанное со взаимодействием с лидером (впереди идущим ТС). Параметр  $\delta$  отвечает за поведение, связанное с разгоном. Значение  $\delta = 1$  соответствует экспоненциальному по времени разгону, характерному для большинства других моделей. При увеличении этого параметра ускорение не убывает экспоненциально в процессе разгона (в пределе при  $\delta \rightarrow \infty$  происходит разгон с постоянным ускорением  $a_n$  вплоть до достижения желаемой скорости  $v_n^0$ ), что лучше соответствует поведению водителей. Параметр торможения  $s_n^*$  зависит от отношения *желаемой дистанции* (безопасного расстояния) и фактической дистанции  $s_n$ , причем желаемая дистанция вычисляется по выражению

$$s_n^*(v_n, \Delta v_n) = s_n' + s_n'' \sqrt{\frac{v_n}{v_n^0}} + T_n v_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}.$$

Параметры модели могут быть выбраны индивидуально для каждого  $n$ -го автомобиля, что позволяет учесть индивидуальные характеристики водителей и ТС. Однако многие общие характеристики потока могут быть получены из рассмотрения идентичных водителей. Параметры имеют следующую содержательную интерпретацию:  $v_0$  – желаемая скорость;  $T$  – безопасный временной интервал;  $a$  – максимальное ускорение;  $b$  – комфортное (не экстренное) торможение;  $\delta$  – показатель чувствительности при ускорении;  $s'$  и  $s''$  – заторные дистанции;  $l$  – длина автомобиля.

Для сокращения числа параметров можно упростить уравнение, положив  $\delta = 1$ ,  $s'' = 0$  и  $l = 0$ , при этом адекватность ИМ значимо не ухудшается.

В равновесном потоке, когда  $\frac{\partial v_n}{\partial t} = 0$  и  $\Delta v_n = 0$ , водители транспортных средств стремятся сохранить зависящую от скорости равновесную

дистанцию до лидера  $s_e(v) = s^*(v,0)[1 - (v/v_0)^\delta]^{-1/2}$ . Из этого соотношения можно найти равновесную скорость и построить фундаментальную диаграмму. В частности, в специальном случае, когда  $\delta = 1$  и  $s' = s'' = 0$ , можно найти аналитическое выражение для равновесной скорости:

$$v_e(s) = \frac{s^2}{2v_0 T^2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4T^2 v_0^2}{s^2}} \right].$$

Из этого выражения и соотношения, связывающего дистанцию с плотностью ТС  $s = (1/\rho - 1/\rho_{\max})$ , получаем равновесный поток  $Q_e(\rho) = \rho v_e(\rho)$  как функцию плотности, т. е. *фундаментальную диаграмму* (функциональная зависимость между величиной потока ТС и плотностью ТП). Коэффициент  $\delta$  влияет на форму диаграммы таким образом, что при росте  $\delta$  переход от свободного к загруженному режиму становится более резким. В пределе при  $\delta \rightarrow \infty$  и  $s'' = 0$  фундаментальная диаграмма становится треугольной с углом в точке максимального потока

$$Q_e(\rho) = \min \left( \rho v_0, \frac{1 - \rho(1 + s')}{T} \right).$$

Эксперименты с использованием данной модели показали реалистичное поведение, а также воспроизведение основных наблюдаемых свойств ТП и устойчивость свойств модели к вариациям параметров.

**Клеточные автоматы.** В таких моделях время, скорость и координата автомобиля представляются дискретными переменными. Дорога при этом разбивается на отдельные «ячейки», каждая из которых в любой момент времени либо свободна, либо занята одним ТС. На каждом шаге состояние всех ячеек одновременно обновляется по следующим правилам.

1 Ускорение. Если  $v_n < v_{\max}$ , то скорость  $n$ -го автомобиля увеличивается на единицу, если  $v_n = v_{\max}$ , то скорость не меняется (реализация общей тенденции водителей двигаться с максимально допустимой скоростью).

2 Торможение. Если дистанция до лидирующего автомобиля  $d_n < v_n$ , то скорость  $n$ -го автомобиля уменьшается до  $d_{n-1}$  (гарантия отсутствия столкновений с впереди идущим ТС).

3 Случайные возмущения. Если  $v_n > 0$ , то скорость  $n$ -го автомобиля может быть уменьшена на единицу с вероятностью  $p$ . Скорость не изменяется, если  $v_n = 0$  (учет случайных различий в поведении водителей).

4 Движение. Каждое ТС продвигается вперед на количество ячеек, соответствующее его новой скорости после выполнения первых трех шагов.

Вышеизложенная модель является «минимальной», то есть описывает только самые основные и важные аспекты процесса движения. Модель КА является весьма неустойчивой при высоких плотностях потока, главным

образом в развитии неустойчивости играет роль стохастичность процесса. Этот факт является серьезным недостатком модели.

**Вывод.** Процесс моделирования ТП позволяет получить информацию, которая помогает принимать решения о дальнейшем развитии и управлении транспортной системой. В частности, моделирование позволяет определить потребности в постройке новых или расширении старых дорог, транспортных систем и терминалов, размещении новых светофоров и дорожных знаков или изменении расположения уже имеющихся. Грамотное планирование развития ДС на основе полученных данных позволяет снизить нагрузку на критических участках ДС, избежать пробок и уменьшить среднее время в пути для участников движения.

Существует ряд теоретических трудностей, не позволяющих создать единую модель, совмещающую в себе прогнозное и имитационное моделирование. Это связано с тем, что в основе этих моделей лежат разные начальные условия: имитационные модели работают с усредненными характеристиками потока и рассматривают каждый автомобиль в отдельности, в то время как прогнозные берут за основу характеристики сети и ее геометрию. Таким образом, невозможно однозначно сказать, какой тип моделей (и тем более какая конкретно модель) является наиболее оптимальным вариантом для решения транспортных задач.

Если необходимо рассчитать корреспонденцию или спрогнозировать ТП на данном участке дороги, используют модели из класса прогнозных, в основном реализующие алгоритмы равновесного распределения. Для анализа же параметров движения, задержек и пропускной способности участков ДС используют имитационные модели. Приведенная в подразделах 1.2 и 1.3 классификация прогнозных и имитационных моделей позволяет в зависимости от конкретной цели выбрать подходящую.

## 2 ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1 Основные задачи транспортного моделирования

**Транспортное моделирование** – это процесс создания рабочей модели ДД, соответствующего транспортным и пешеходным потокам в реальных условиях на ДС.

Задачи транспортного моделирования:

*В масштабе городской агломерации*, как правило, требуется решение задач и получение ответов на следующие вопросы:

– как изменится функционирование городской транспортной системы при изменении внешних транспортных связей, например, при строительстве объездной автомобильной дороги и выводе транзитных потоков за пределы городской территории или при выносе крупных объектов тяготения за городскую черту;

– как изменится работа транспортной системы при введении в эксплуатацию новых элементов ДС (развязки, дополнительные транспортные связи и т. п.) или других элементов транспортной системы (линий метро и т. п.);

– каких изменений в транспортной системе города может потребовать строительство нового жилого района или другого центра тяготения;

– какого перераспределения ТП и потоков пассажиров следует ожидать в случае временного закрытия или ликвидации какого-либо элемента транспортной системы;

– каким образом отразится на работе транспортной системы введение различного рода ограничений на передвижение по городской территории (платный проезд по магистрали, плата за въезд в тот или иной район, введение зонального тарифа на ГПТ и т. п.);

– какой эффект может дать развитие АСУДД и др.

*На локальном уровне* требуется решение задач с ответами на вопросы:

– какой эффект даст та или иная модернизация элемента ДС (перепланировка транспортного узла или группы узлов, расширение проезжей части улицы и т. п.);

– как изменение в организации движения может повлиять на пропускную способность узла или группы узлов (ограничение направлений движения, оптимизация светофорного цикла, изменение условий пересадки пассажиров и т. п.).

Работа всех элементов транспортной системы города: дорожного хозяйства, ГПТ, энергообеспечения, регулирования и контроля ДД – тесно взаимосвязана. С учетом этого на практике может возникнуть потребность анализа работы отдельных элементов транспортной системы.

Важнейшая цель транспортного моделирования – составление объективных прогнозов транспортной ситуации в зависимости от внешних (социально-экономических, демографических, природно-климатических) и внутренних (развитие ДС, ГПТ, АСУДД и т. п.) изменений, анализ и подготовка рекомендаций для инвестиционных проектов в области инфраструктуры. При этом пропускная способность дороги или узла (перекрестка) является важнейшим критерием, характеризующим функционирование путей сообщения. Под пропускной способностью понимают максимально возможное число ТС, которое может пройти через сечение дороги в единицу времени.

Транспортная ситуация может моделироваться на любой расчетный срок – от оперативных задач сегодняшнего дня до долгосрочной (на 20–30 лет) перспективы развития города, городской агломерации или более крупного региона.

Условно задачи прогнозирования можно разделить:

- на долгосрочные (с перспективой более 5 лет);
- среднесрочные (с перспективой до 5 лет);
- краткосрочные (анализ последствий намечаемых мероприятий после непосредственной их реализации и стабилизации транспортных потоков, обычно в сроки до 6 мес.);
- оперативные (в реальном масштабе времени).

## 2.2 Transyt

**Transyt** – программный пакет компьютерного имитационного макроскопического моделирования транспортных систем.

Основные возможности программы Transyt (рассматриваются возможности 15-й версии программы и Transyt-7FR) [60, 61].

1 Большое число используемых для минимизации целевых функций:

- минимизация суммарных задержек ТС и пешеходов;
- минимизация количества остановок ТС;
- минимизация расхода топлива ТС;
- максимизация пропускной способности участка УДС;
- минимизация очередей.

2 Способность оптимизировать параметры светофорного регулирования (длительность цикла, количество фаз и их длительность, смещение фаз светофорных циклов между перекрестками).

Существует возможность графической редактируемой анимации пешеходных и ГПТ на каждом пешеходном переходе (рисунок 2.1) [60].

Transyt обладает возможностью 3D-представления дорожных сетей и ТП на них (рисунок 2.2, а), исходных данных и результатов моделирования (рисунок 2.2, б).

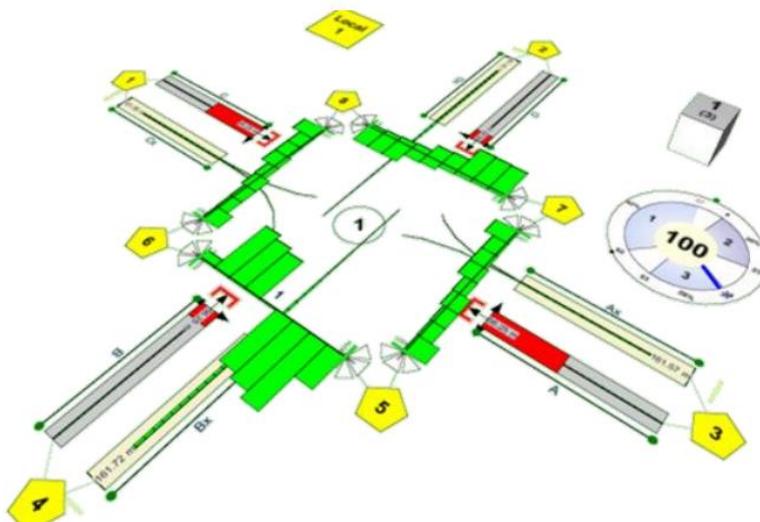


Рисунок 2.1 – Пример анимации пешеходных потоков

Данный режим также позволяет отобразить трехмерные профили движения и сигналов светофоров в сочетании с возможностью приведения в фоновое изображение (подложка рабочей области) аэрофотоснимков, картинок из Google maps и других карт, чертежей, трехмерных моделей зданий и уличных объектов в формате Collada (рисунок 2.2, в) [61].

а)

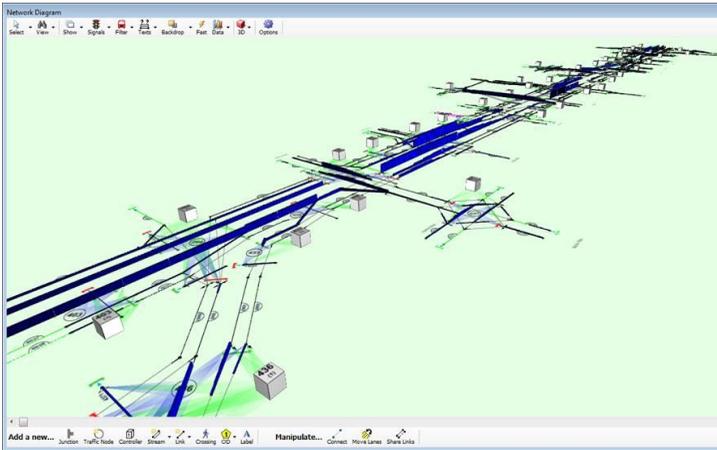
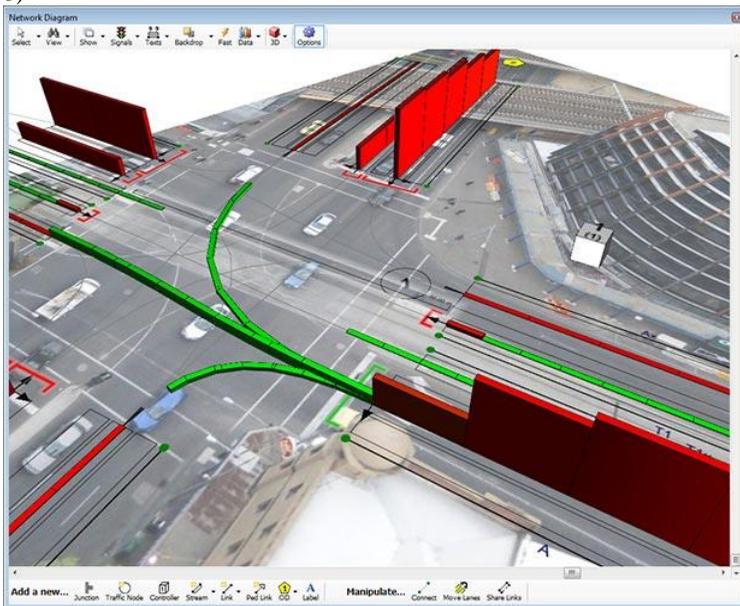


Рисунок 2.2 (начало) – Пример режима 3D при отображении:  
а – входных данных

б)

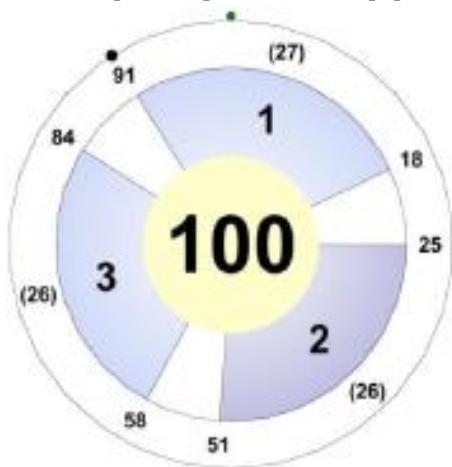


б)



Рисунок 2.2 (окончание) – Пример режима 3D при отображении:  
б – результатов; в – уличных объектов в формате Collada

В программе существует инструмент автоматического расчета конфликтных точек ТС, а также потока насыщения с учетом состава ТП. Transyt имеет возможность остановки анимации, визуализирует временное колесо для редактирования светофорного цикла (рисунок 2.3).



Область временного колеса состоит из трех концентрических кругов:

- внутреннее кольцо показывает длительность цикла регулирования;
- среднее – стадии основного сигнала (синий цвет) и переходных интервалов (белый цвет);
- внешнее – число в скобках указывает на продолжительность каждой из стадий (в секундах), а без скобок – начало и конец каждой из стадий.

Более подробно применение данной программы при приведено в приложении Б на примере моделирования работы одного регулируемого перекрестка, двух и более связанных регулируемых перекрестков.

### 2.3 ArteryLite

**Программный комплекс ArteryLite** – программный продукт компьютерного имитационного макроскопического моделирования транспортных систем [63] с применением данных, полученных как с использованием детекторов ТС, так и методами транспортных обследований (рисунок 2.4).

При установке нового светофорного объекта или реконструкции существующего программный комплекс ArteryLite в автоматическом режиме позволяет выполнить следующие процедуры:

- определяется оптимальное количество фаз светофорного объекта, необходимое для наилучшего транспортного обслуживания в течение недели;
- рассчитываются оптимальные параметры всех режимов работы светофорного объекта на неделю пакетно, методом «одной кнопки»;
- составляются календарные расписания с учетом технических возможностей дорожного контроллера светофорного объекта;
- вычисляются технико-экономические показатели работы регулируемого перекрестка «до» и «после» оптимизации.

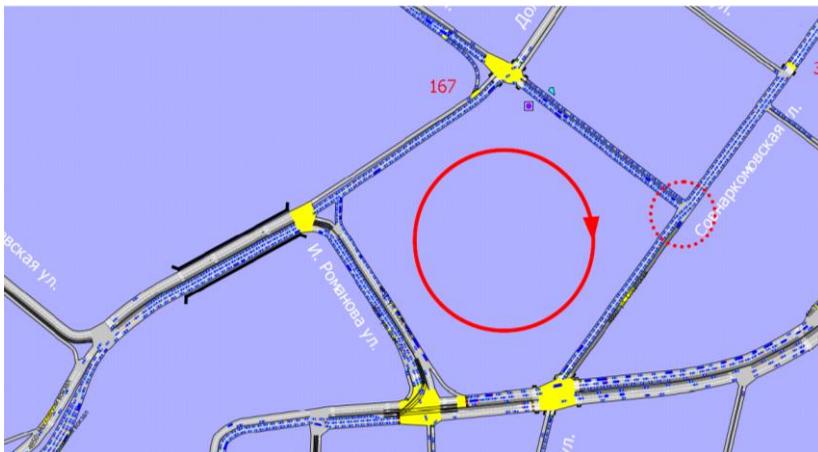




Рисунок 2.4 – Пример оптимизации работы УДС в Нижнем Новгороде с помощью программы ArteryLite [63]

При выполнении расчетов в программе ArteryLite создается модель, которая основывается на описании топологии перекрестка (группы перекрестков), выполненном в программных средах Transyt-7FR или Synchro.

Далее осуществляется пошаговое моделирование транспортной ситуации на перекрестке: привязка детекторов ТС к направлениям и полосам движения, расчет потоков насыщения, описание фаз и выбор алгоритмов для последующих расчетов. В качестве исходных данных в модель вносятся следующие характеристики: интенсивность движения ТС; состав ТП (доля грузовых и легковых автомобилей, автобусов и т. п.); характер изменения интенсивности движения в течение суток, дней недели; скорость движения автомобилей. Затем по специальным алгоритмам осуществляется автоматический расчет оптимальных параметров светофорных циклов для каждого установленного отрезка времени. Данный программный комплекс сочетает многопараметрическую оптимизацию, использующую генетический алгоритм вместе с имитационным макро моделированием.

Возможно проведение адаптации выбранного на основании данных детекторов ТС режима работы перекрестка к меняющейся транспортной ситуации (режим «экспертный план»). По результатам расчета формируется пакет оптимальных фазовых таблиц с возможностью его редактирования в ручном режиме. Сформированный пакет представляется в виде отчета, который можно экспортировать в формат управляющей программы (и передать непосредственно в дорожный контроллер) либо в файл MS Excel.

В состав программного комплекса также входит инструмент для сбора и анализа данных, накапливаемых детекторами ТС. Результаты транспортного обследования визуализируются для удобного использования в расчетах.

Эффективность от установки нового светофорного объекта, реконструкции ДС, оптимизации параметров светофорных циклов на регулируемых перекрестках можно всесторонне оценить и продемонстрировать с использованием четырнадцати показателей технико-экономической эффективности (общая задержка ТС, суммарные задержки пассажиров, время в заторах, расход топлива и т. д.). Затем можно сравнить полученные результаты с исходными по показателям технико-экономической эффективности.

## 2.4 Paramics

Программа предназначена для оптимизации процессов в ДД за счет моделирования транспортных и пешеходных потоков, анализа различных вариантов организации ДД в широком диапазоне – от единичного пересечения до транспортной системы целого города [62].

В Paramics можно создавать регулируемые перекрестки на основе готовых шаблонов. Динамика ТП заносится в модель с помощью детекторов ТС, которые устанавливаются на участках ДС (рисунок 2.5).

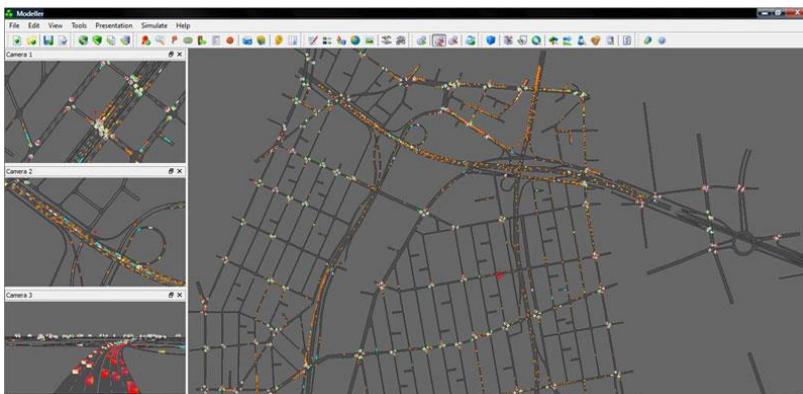


Рисунок 2.5 – Пример рабочего окна программы Paramics

Инструментарий позволяет в реальном времени оптимизировать светофорные циклы и создавать координированное движение ТС (рисунок 2.6).

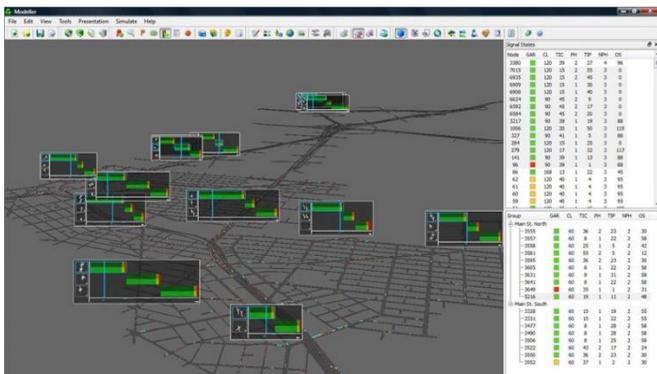


Рисунок 2.6 – Пример работы с настройками светофорных циклов в Paramics

Программа позволяет решить следующие задачи:

- оценить задержки пешеходов и вероятность возникновения конфликта между потоками пешеходов и автомобилями;
- выполнить графический дизайн городского пространства с помощью анимированных вариаций, в том числе с помощью визуализации пешеходного движения;
- рассчитывать выбросы выхлопных газов для различных типов ТС (при этом характеристики двигателя и стилей вождения могут быть взяты из библиотеки или дополнены, выбросы выхлопных газов ТС рассчитываются на основании фактической скорости движения транспорта);
- учитывать и моделировать динамику пассажиропотоков ГПТ;
- оценивать безопасность высадки и посадки пассажиров, перемещения пешеходов в час пик (рисунки 2.7–2.10).



Рисунок 2.7 – Пример визуализации анимации пешеходного движения

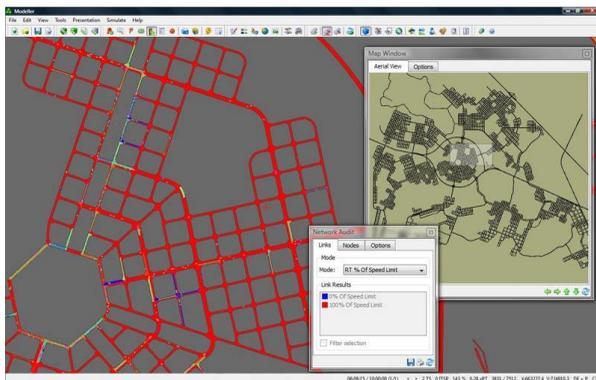


Рисунок 2.8 – Пример результатов моделирования выбросов выхлопных газов ТС



Рисунок 2.9 – Пример моделирования динамики пассажиропотоков

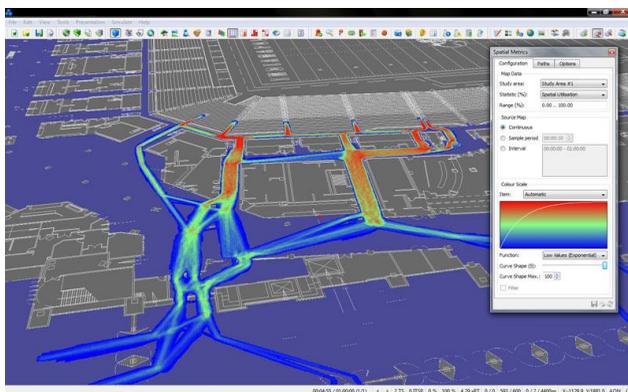


Рисунок 2.10 – Пример оценки безопасности перемещений пешеходов

## 2.5 VISSIM

**VISSIM** – многоцелевой программный продукт компьютерного имитационного микроскопического моделирования транспортных систем, позволяющий анализировать и оптимизировать городские и междугородние ДС. Он нашел широкое применение в Европе, США и многих других странах [64], так как позволяет моделировать городские перекрестки любой сложности и типа регулирования, анализировать пропускную способность транспортных сетей и тестировать схемы с различными приоритетами. Также VISSIM позволяет создавать и управлять системами контроля динамики пассажиропотока ГПТ, рассчитывать необходимую емкость стояночных площадок, моделировать ТП с пересечениями и / или пересадками для различных видов ГПТ (автобусы, метро, железная дорога, эскалатор и т. д.).

Основным ограничением являются характеристики компьютера, а по размеру транспортной сети и количеству ТС возможности VISSIM не ограничены. Программа позволяет с любой точностью детализировать схему транспортной сети со всеми маршрутами, переходами, стоянками, остановками общественного транспорта. В моделировании принимают участие все виды ТС (легковые и грузовые автомобили, автобусы, трамваи, поезда, мотоциклы, велосипеды), а также пешеходы и пассажиры. Для всех видов ТС можно дополнительно уточнить характеристики (габариты, мощность двигателя, ускорения разгона и торможения, вес и т. д.). При желании пользователь может создать новый тип ТС.

В качестве исходных данных также задаются параметры интенсивности ТП, его состава, параметры циклов светофорного регулирования, вероятности выбора маршрута передвижения пассажирами и прочее. Также поддерживается возможность подключения матрицы корреспонденций для пассажиров.

Поведение водителя за рулем при моделировании ТП реализовано с помощью модели Видерманна. В ней учитываются психофизические возможности человека (зависимость внимания и времени реакции от различных факторов, в том числе для различных условий окружающей среды).

Основные задачи, решаемые VISSIM:

- сбор статистики на любом участке транспортной сети, формирование отчетов, создание презентаций и видеороликов;
- оценка влияния различных факторов на пропускную способность участков ДС (нерегулируемые и регулируемые перекрестки, кольцевые развязки в одном уровне, железнодорожные переезды, развязки в разных уровнях);
- проектирование, тестирование и оценка влияния режима работы

светофоров на характеристики ТП;

- анализ системы управления ДД а целом либо анализ эффективности проводимых мероприятий на автомобильных дорогах и городских улицах;
- анализ результатов по предоставлению приоритета в движении МТС;
- анализ пропускной способности больших дорожных сетей (например, сети автомагистралей или всей городской ДС) при динамическом взаимодействии ТП (например, при планировании парковок);
- детальная имитация передвижения каждого из участников движения;
- моделирование пассажирских и ТП возле ОП МТС и станций метрополитена с учетом их взаимного влияния;
- расчет аналитических показателей качества ДД (более 50 различных оценок и аналитических коэффициентов), автоматическое построение в Microsoft Excel графиков временной загрузки сети и т. п.

На рисунке 2.11 приведены результаты решения задачи транспортного обеспечения территории проектируемого стадиона «Зенит» в г. Санкт-Петербурге, на рисунке 2.12 – результаты оценки целесообразности строительства путепровода при существующей схеме движения ТП в г. Перми.



Рисунок 2.11 – Пример применения VISSIM при строительстве стадиона «Зенит» в г. Санкт-Петербурге [64]



Рисунок 2.12 – Пример применения VISSIM при строительстве путепровода в г. Перми [64]

## 2.6 LISA+

**Программный продукт LISA+** является инструментом для разработки и оптимизации режимов регулирования светофорных объектов, разработки координированного светофорного регулирования (в основе – графоаналитический метод) и алгоритмов адаптивного управления [65]. В дальнейшем полученные результаты можно экспортировать-импортировать в VISSIM и моделировать различные варианты организации ДД, используя инструментарий последней программы. LISA+ имеет возможность передачи данных разработанного режима регулирования в дорожные контроллеры (Siemens, Swarco, Cross и др).

Основные задачи, решаемые с помощью LISA+:

- оценка и автоматический расчет светофорных циклов для простого (рисунок 2.13) и составного участка дорожной сети;
- расчет светофорных циклов для организации координированного управления светофорными объектами (рисунок 2.14);
- разработка режимов регулирования для светофорного объекта с применением адаптивного управления на локальном уровне;
- оценка разработанных алгоритмов управления в модели VISSIM;
- определение возможных конфликтных зон и расчет «времен разгрузки» для устранения конфликтов с использованием видеофайлов.

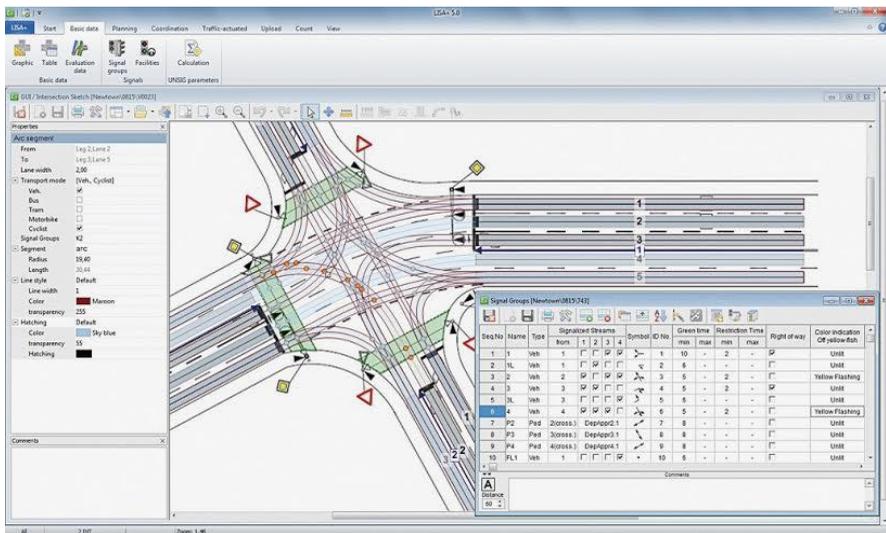


Рисунок 2.13 – Пример расчета светофорного цикла для перекрестка [65]

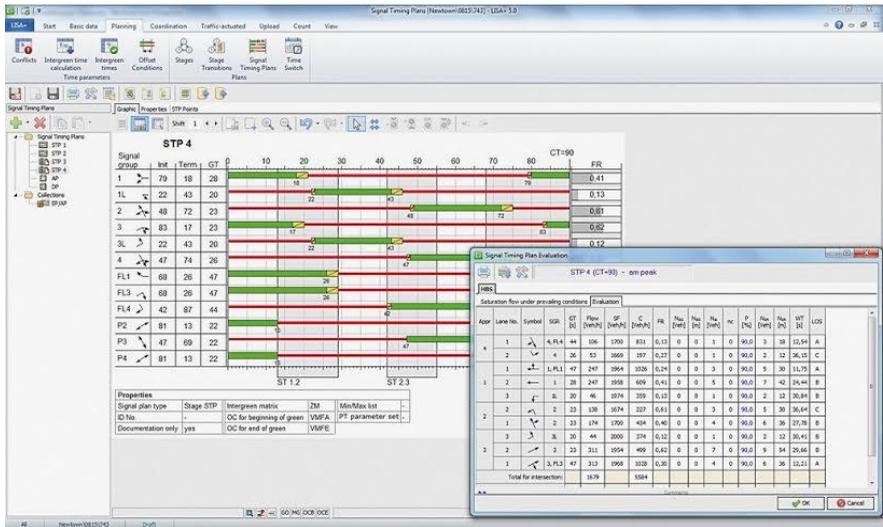
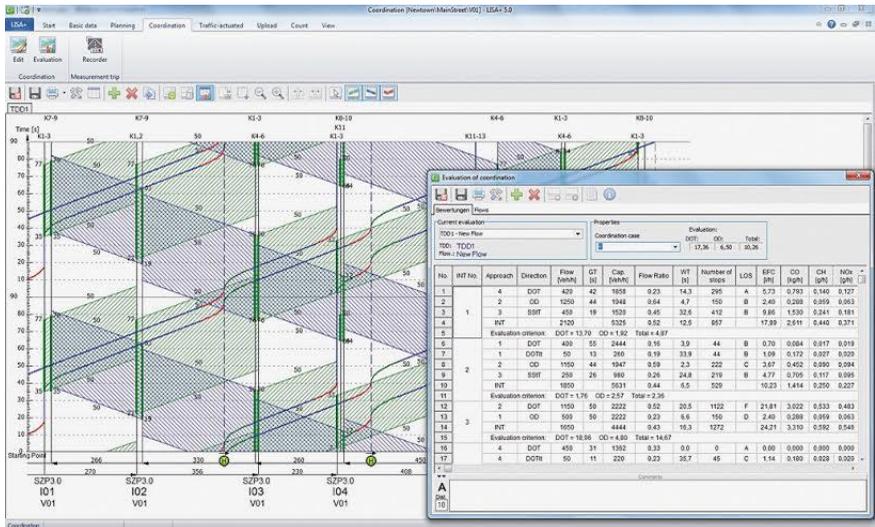


Рисунок 2.14 – Пример расчета светофорных циклов для координированного управления светофорными объектами в режиме «зеленая волна» [65]

Инструментарий программного продукта LISA+ позволяет изменять множество параметров ТС: длину, радиус поворота, динамические характеристики и т. д.

## 2.7 VISUM

**VISUM** – многоцелевой пакет для имитационного моделирования ТП, транспортного планирования и оптимизации пассажиропотоков ГПТ.

Программа может использоваться при решении следующих задач:

- распределение существующих ТП (рисунок 2.15);
- расчет транспортной потребности городов в перевозках ГПТ;
- оценка различных дорожно-транспортных ситуаций и вариантов развития дорожной инфраструктуры;
- оценка качества работы транспортной сети в целом по разработанной системе показателей качества (транспортная обеспеченность территории, оценка транспортной доступности территорий для различных групп населения);
- визуализация данных в виде графиков и видеофайлов, применительно к транспортной системе города, региона, страны;
- технико-экономическое обоснование различных инвестиционных проектов для развития дорожной инфраструктуры моделируемого региона (строительство или реконструкция автомобильных дорог или улиц; реорганизация работы ГПТ; строительство крупных промышленных, торговых, развлекательных объектов на территории моделируемого региона с выявлением возможных транспортных проблем);
- оптимизация потоков индивидуальных ТС и ГПТ (расчет объемов перевозок различными видами транспорта; оценка себестоимости ГПТ; анализ топологии сети ГПТ и оценка ее доступности; оптимизация интервалов выпуска подвижного состава ГПТ; обоснование ввода новых маршрутов и изменение существующих);
- разработка комплексных программ стратегии развития транспортной сети, включающей все виды транспорта.

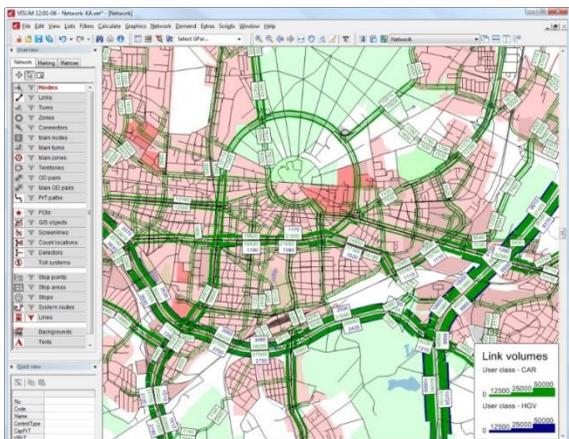


Рисунок 2.15 – Пример расчета ТП в VISUM [64]

Необходимые исходные данные для моделирования в программе:

1) социально-экономические и демографические данные (транспортные районы, статистика по численности населения по районам, географическое распределение рабочих мест, центры тяготения участников ДД);

2) показатели ДС (категории автомобильных дорог и улиц, пропускная способность, количество полос, наличие парковок, вид регулирования движения в транспортных узлах, разрешенные направления на перекрестках и т. п.);

3) характеристики ГПТ (топология маршрутной сети, расписание движения, характеристики подвижного состава, расположение остановочных пунктов и т. п.).

Показатели функционирования транспортных сетей, рассчитываемые в VISUM:

– для ДС – время задержки ТС, время в пути ТС, пройденное расстояние ТС, количество ТС;

– для узловых пунктов (перекрестков) – время задержки ТС и пассажиров на остановках, длина очередей, количество остановок ТС;

– для ГПТ – время движения МТС и средняя скорость сообщения, наличие пробок;

– для произвольного выделенного участка ДС – плотность ТП, интенсивность ТП, средняя скорость ТС.

## 2.8 Дорожный менеджер

«Дорожный менеджер» – программа имитационного моделирования ТП.

Аналитический аппарат программы находит применение при решении следующих задач:

– калибровка модели ТП с помощью информации, полученной от детекторов транспорта;

– моделирование существующих и прогнозируемых ТП в визуальном режиме для ДС города или региона в разные дни недели и периоды суток (имеется возможность ускорять процесс моделирования);

– представление интенсивности ТП на отдельных участках ДС в виде «тепловой карты»;

– перекрытие дороги целиком, отдельного направления или отдельной полосы, причем возможно моделирование перекрытия без оповещения и с оповещением (идеальная ситуация, когда водители всех вновь выезжающих ТС оповещены о том, что определенный участок дороги перекрыт, и они могут выбирать другой маршрут своего передвижения);

– моделирование пассажиропотоков в штатном режиме и при возникновении внештатной (аварийной) ситуации, путем внесения

отклонений в пассажирские потоки и работу транспортной системы непосредственно в ходе симуляции;

- оценка интенсивности пассажиропотоков во всех узлах и участках транспортной сети;

- выявление «узких мест» в транспортной системе (большие очереди на посадку пассажиров, значительное превышение времени следования по маршруту пассажиров из-за пробок и т. п.).

Инструментарий программы позволяет:

- создавать и редактировать участки дорог, перекрестки регулируемые и нерегулируемые (в том числе с проездами во дворы и т. п.), ОП МТС, нерегулируемые пешеходные переходы;

- устанавливать для участков ДС профиль, приоритет, существующие ограничения проезда по типам ТС, максимальную разрешенную скорость;

- графики работы светофоров на регулируемых участках дорожной сети (рисунок 2.16).

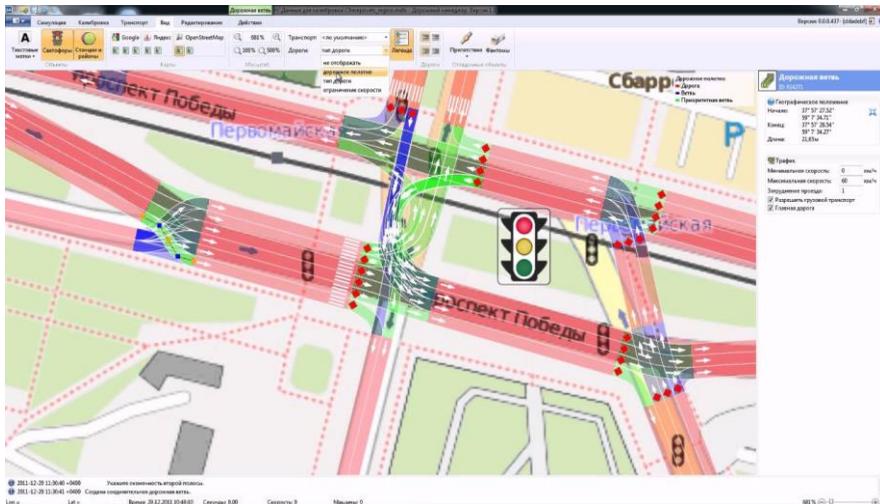


Рисунок 2.16 – Пример рабочего окна в программе «Дорожный менеджер» [66]

В качестве особенностей работы данной программы (в сравнении с другими аналогами) можно выделить следующие.

1 Для построения модели ТП в программе не требуется вносить большое количество статистических данных о населении, географическом распределении рабочих мест и т. д. Формирование модели осуществляется на основе эмпирических данных, полученных с помощью датчиков и информации о свойствах этих участков. Применяемый подход позволяет получить высокую степень адекватности результатов моделирования.

2 Алгоритм движения ТС использует принципы выбора маршрутов реальными водителями и особенности их движения. При этом все параметры алгоритма могут быть изменены пользователем в зависимости от вариантов поведения водителей ТС.

3 Для построения модели ДС не требуется наличия ГИС-информации.

Основные целевые применения решений, получаемых с помощью программы «Дорожный менеджер»:

- для муниципальных организаций – увеличение пропускной способности ДС, уменьшение количества «пробок», снижение аварийности на дорогах, обоснование принятия решений при реорганизации ДС и при проведении работ, связанных с перекрытием участков дорог; предоставление услуг населению по выбору наилучших маршрутов передвижения;

- для транспортных предприятий – анализ исполнимости планов перевозок с выявлением «узких» мест в транспортно-логистической системе и оптимизация планов перевозок;

- для предприятий по управлению ДД и техническому обслуживанию ДС – оптимизация светофорных циклов; сравнение различных вариантов схем организации ДД; планирование мероприятий по организации ДД при проведении работ, связанных с перекрытием участков дорог; планирование перевозок при проведении масштабных мероприятий или в условиях чрезвычайной ситуации; оценка эффективности мероприятий по изменению параметров ДС, схем организации движения и необходимости внедрения АСУДД или адаптивного светофорного регулирования;

- для научно-исследовательских и проектных организаций, а также профильных вузов – исследование эффективности проектируемых транспортных развязок и схем организации движения; исследование влияния особенностей поведения водителей на характеристики ТП; выполнение научно-исследовательских работ в сфере проектирования и организации ДД; организация учебного процесса (лабораторные работы, курсовое и дипломное проектирование) на базе программного комплекса «Дорожный менеджер-М».

## 2.9 AnyLogic

**AnyLogic** – программный продукт ИМ, позволяющий моделировать движение ТС по ДС, оценивать влияние режимов работы светофоров на ТП, анализировать наполнение парковок, моделировать движение МТС, а также пешеходов [70].

Основные возможности AnyLogic:

- простота создания моделей, ориентированность на специалистов предметной области, а не на специалистов по имитации;

- наличие графического интерфейса разработки моделей, который

ускоряет процесс их создания;

- расширяемость моделей за счет открытого программного кода;
- широкая экспериментальная база, основанная на методе Монте-Карло, и различные виды оптимизации;
- возможность создания интерактивной анимации;
- наличие удобных средств калибровки моделей, обеспечивающих возможность повышения адекватности моделирования;
- возможность работы в Windows, Mac OS и Linux без лицензии на запуск моделей и возможность запуска их из любого браузера.

Для моделей транспортных систем с помощью AnyLogic можно создавать и редактировать элементы ДС [71] (рисунок 2.17), маршруты ГПТ и ОП на них, участки со светофорным регулированием, задавать расписание движения МТС, их тип, скорость передвижения и т. д.

С помощью модели можно оценивать загруженность участков ДС, изменять траектории маршрутов и расположение ОП, исследовать наполнение МТС в часы пик.

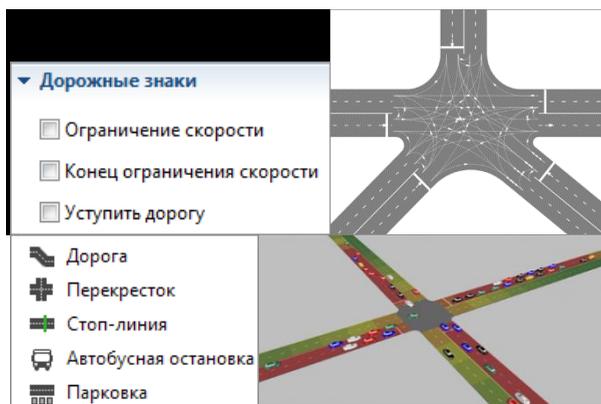


Рисунок 2.17 – Пример графической визуализации AnyLogic

Моделирование пешеходных потоков [72] (рисунок 2.18) позволяет решить следующие задачи:

- рассчитать пропускную способность пешеходных элементов ДС;
- организовать процесс ожидания и покупки билетов с наименьшими очередями и помехами;
- проанализировать варианты эвакуации людей в нештатных (аварийных) ситуациях.

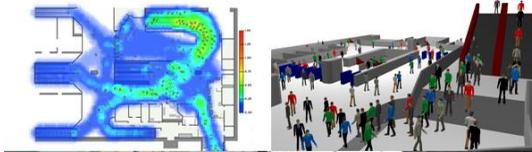


Рисунок 2.18 – Пример моделирования пешеходных потоков

## 2.10 Светофор, DeskTran, Dracula, AIMSUN

«Светофор» – программный продукт для аналитического расчета режимов светофорного регулирования [69].

Область применения данной программы ограничивается следующими задачами: расчет параметров светофорного регулирования; выбор геометрических параметров регулируемых пересечений; оценка качества ОДД на регулируемых пересечениях.

Количество примыкающих к перекрестку дорог и число пешеходных переходов в программе «Светофор» не ограничено (рисунок 2.19).

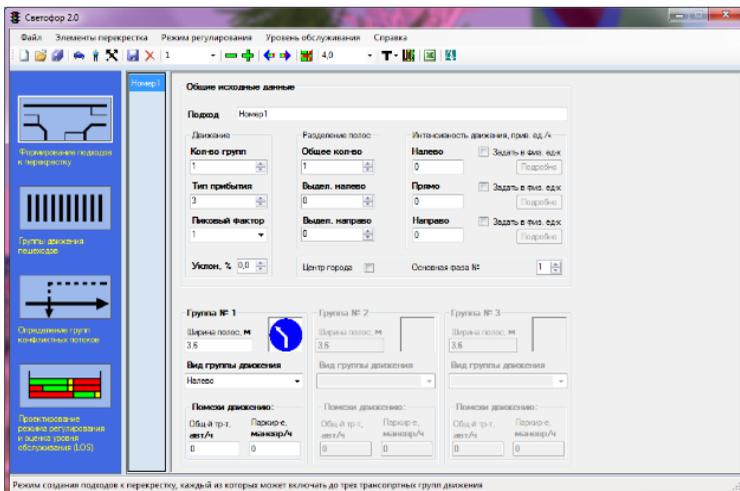


Рисунок 2.19 – Пример рабочего окна в программе «Светофор»

Программа позволяет учитывать такие факторы, как пешеходные потоки, наличие парковок и ОП МТС, влияние предыдущего светофорного объекта на рассматриваемый.

В программе производится расчет минимальных длительностей зеленого сигнала для пешеходов, расчеты задержек и характеристик транспортного обслуживания для каждой полосы и для всего перекрестка в целом, выполняется расчет длин очередей ТС для каждой полосы.

Результаты расчета можно экспортировать в приложения Microsoft Excel (основные параметры ТП и показатели эффективности) и AutoCad (режим работы светофорной сигнализации).

Программа «**DeskTran**» предназначена для автоматизированного управления светофорными объектами в городской среде, а также моделирования ТП. Целевой функцией DeskTran является реализация максимальной пропускной способности ДС города [73] (рисунок 2.20).

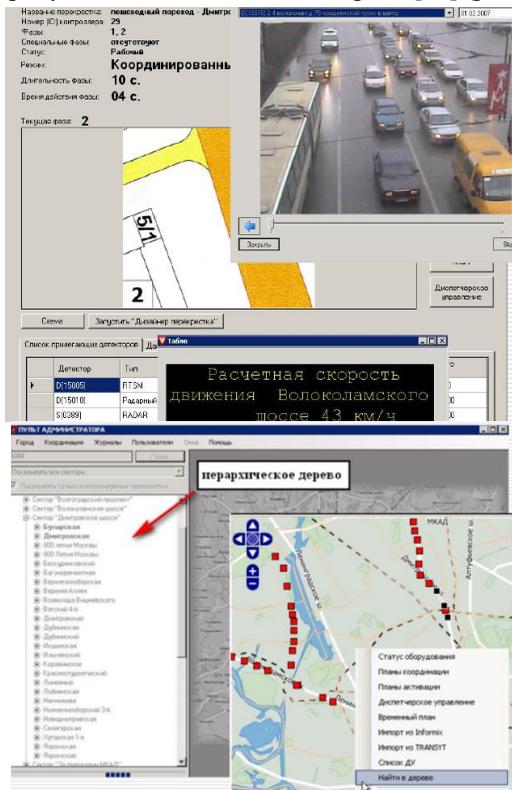


Рисунок 2.20 – Пример рабочих окон в программе «DeskTran»

Основные возможности и особенности работы в данной программе:

- дистанционное взаимодействие с дорожными контроллерами, динамическими информационными табло и детекторами ТС с использованием проводных и GPRS технологий связи;
- создание моделей перекрестков, настройки их транспортных и географических параметров для последующего автоматического расчета синхронизированных режимов работы светофорных объектов (временных планов);
- расчет и создание координированного управления для районов дорожной сети;
- загрузка временных планов в дорожные контроллеры различных типов;
- расчет оптимальных временных режимов проезда перекрестка с учетом геометрии, топологии и структуры светофорного цикла;
- возможность диспетчерского управления светофорным объектом как на одном перекрёстке, так и на их группе;
- автоматическое квазиадаптивное управление дорожными контроллерами в зависимости от транспортной ситуации;
- работа с программным комплексом через интернет;
- многоуровневая система безопасности и ролевой доступ пользователей к системе;
- оперативное получение текущих данных мониторинга, статистической обработки данных и видеозаписей.

Программа «**DRACULA**» применяется для моделирования ТП с помощью процедур микро- (на уровне отдельного водителя) и макромоделирования (рисунок 2.22). Разработчиками также заявлена возможность использовать матрицы корреспонденции [74].



Рисунок 2.21 – Пример использования программы Dracula

Программа позволяет моделировать:

- влияние на ТП специальных условий (несчастные случаи, стихийные бедствия, погодные условия);
- реакцию водителей на наличие информации в пути (когда, например, во время движения появляется информация о заторах);
- преодоление сценариев, связанных с чрезвычайными ситуациями.

«AIMSUN» представляет собой программное обеспечение, обладающее полнофункциональным комплексом инструментов для анализа ТП [75].

Программа основана на микроскопическом моделировании. Поведение каждого ТС в сети постоянно корректируется во времени согласно различным настраиваемым моделям поведения водителя (ведомый автомобиль, смена полосы и т. п.). «AIMSUN» сочетает дискретно-непрерывный подход к моделированию: состояние ряда используемых элементов транспортных систем (ТС, детекторы) постоянно изменяется в течение периода моделирования, а для других элементов (светофоры, входы в узлы) их состояние изменяется дискретно (рисунок 2.22).

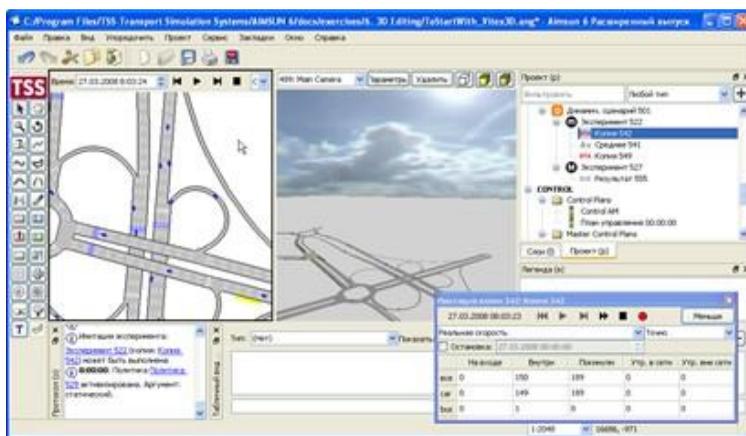


Рисунок 2.22 – Пример рабочего окна программы «AIMSUN»

Исходная информация для моделирования, планирования или визуализации в программе может быть загружена с транспортных детекторов в режиме реального времени либо из баз данных.

Пакет реализует интегрированную платформу, позволяющую выполнять как статическое, так и динамическое моделирование. Предусмотрена возможность импортировать и обрабатывать данные из различных ГИС, включая ESRI, Tele Atlas, NAVTEQ и пр. Также существует возможность считывания графической информации САПР и растровых изображений, что упрощает задачи редактирования и представления проектной документации.

Пакет поддерживает различные форматы данных иных приложений (Emme/2, Contram, Saturn, Transyt-7F, Transyt 12, VS-Plus).

### 2.11 Сравнительный анализ возможностей современных программных средств транспортного моделирования

Для сравнения возможностей некоторых из рассмотренных выше программ [76] сначала выделим значимые для анализа транспортной ситуации объекты и явления моделирования и обозначим их в скобках цифрой: погодные условия (1); исследование наличия парковочных мест (2); учет припаркованных ТС (3); учет характеристик двигателей (4); учет коммерческих ТС (5); учет велосипедов и мотоциклов (6); моделирование движения пешеходов (7); моделирование ДТП (8); моделирование работы ГПТ (9); инструменты оптимизации ТП (10); инструменты по рассасыванию заторов (11); моделирование взаимодействия ТП (12).

В таблице 2.1 символом X отмечены возможности разных программ.

Таблица 2.1 – Возможности описания объектов и явлений в программах

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AIMSUN2	–	–	–	–	–	–	–	X	X	–	X	X
Dracula	X	–	–	–	X	–	–	X	X	–	X	X
Paramics	X	X	–	–	X	–	–	X	X	X	X	X
VISSIM	–	–	X	X	X	–	X	X	X	X	X	X

С учетом целей моделирования (таблица 2.2) возможности программ отражены в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Цели моделирования

Цель	Индикатор	Цель	Индикатор
Эффективность	E1: разделение по типу ТС	Безопасность	S1: интервалы движения
	E2: время на перемещение		S2: обгон
	E3: изменение времени перемещения		S3: время инцидента
	E4: скорость		S4: число ДТП
	E5: заторы		S5: скорость и последствия ДТП
	E6: регулярность общественного транспорта		S6: взаимодействие с пешеходами
	E7: длина очереди		Удобства
Окружающая среда	F2: стресс		
	V1: выбросы вредных веществ		

	V2: уровень придорожного загрязнения	Технические особенности	T1: потребление топлива
	V3: уровень шума		T2: эксплуатационные затраты

**Таблица 2.3 – Целевые возможности программного обеспечения**

Программа	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	S1	S2	S3	S4	S5	S6
AIMSUN2	X	X	–	X	–	–	X	–	–	–	–	–	–
Dracula	–	X	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Paramics	–	X	X	X	X	X	X	X	X	–	–	–	–
VISSIM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	–	–	X

*Окончание таблицы 2.3*

Программа	V1	V2	V3	F1	F2	T1	T2
AIMSUN2	X	–	–	–	–	X	–
Dracula	X	–	–	–	–	X	–
Paramics	X	–	X	–	–	X	–
VISSIM	X	–	–	–	–	X	–

В таблице 2.4 приведены возможности программных пакетов транспортного моделирования по следующим параметрам: использование показателей по умолчанию (1); возможность изменения ключевых параметров пользователем (2); отсутствие сложных манипуляций при получении и накоплении данных (3); простая интеграция с другими моделями (4); простая интеграция с другими базами данных и ГИС-системами (5); широкое применение национальными транспортными организациями (6); возможность запуска на дешевых аппаратных средствах (например, PC, а не Unix) (7); типичная скорость расчетов (F – быстро, S – медленно; число показывает, насколько расчет быстрее реального времени моделирования) (8); графический редактор для построения УДС (9); визуализация результатов моделирования (10).

**Таблица 2.4 – Другие возможности программного обеспечения**

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIMSUN2	X	X	–	X	X	–	PC, Unix	–	X	X
Dracula	X	X	X	X	–	–	PC	F 20	–	X
Paramics	X	X	–	X	–	–	Unix	F 2	X	X
VISSIM	X	X	X	–	X	GMT	PC, Unix	real	X	X

В таблице 2.5 представлены дополнительные возможности программ: координация светофорного регулирования (1); адаптация светофорных сигналов по информации от детекторов (2); возможность приоритетного проезда для МТС (3); наличие измерительных рамп (4); контроль динамики ТП (5); возможность внесения ДТС или ДТП (6); увеличение и

рассмотрение отдельной части ДС (7); необходимость в региональной транспортной информации (8); статическое управление маршрутами ГПТ (9); динамическое управление движением МТС и формированием маршрутов ГПТ (10); наличие редактора стояночных площадок (11); информация о ГПТ (12); оценки накопления в очередях (13); адаптивная система автоматического регулирования скорости (14); учет скоростных автомагистралей (15); редактор пешеходов и велосипедистов (16); использование данных от детекторов ТС (17).

*Таблица 2.5 – Возможности описания программы параметрами УДС*

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIMSUN2	X	X	-	X	-	X	X	-	X	X
Dracula	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Paramics	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X
VISSIM	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-

*Окончание таблицы 2.5*

Программа	11	12	13	14	15	16	17
AIMSUN2	-	-	-	-	-	-	X
Dracula	-	-	X	-	-	-	X
Paramics	-	-	X	-	X	-	X
VISSIM	-	X	-	-	-	X	X

## **2.12 Геоинформационные системы анализа дорожной аварийности**

Геоинформационная система (географическая информационная система, ГИС) – программно-аппаратный комплекс, предназначенный для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информации о необходимых объектах [92]. Основная идея ГИС – связь данных на карте и в базе данных.

ГИС может включать в свой состав пространственные базы данных, редакторы растровой и векторной графики, различные средства пространственного анализа данных.

К достоинствам ГИС можно отнести: быструю изменяемость масштаба; преобразование картографических проекций для удобного просмотра; варьирование объектным составом карты; возможность опрашивать через карту многочисленные базы данных в режиме реального времени; изменение способа отображения объектов (цвет, тип линии и т. п.), в том числе и легкость внесения любых изменений.

ГИС позволяет наглядно рассматривать объекты дорожной инфраструктуры города, ТП, дорожные знаки, светофорные объекты.

Применение ГИС позволяет решить следующие задачи.

Построение и оптимизация маршрутов на существующей дорожной сети. В крупных городах много маршрутов ГПТ (метро, автобусы, трамваи, троллейбусы, электрички, маршрутки), поэтому при

оптимизации нужно анализировать не один вид транспорта, а все в комплексе. Эта задача – наиболее сложная организационно, так как требует координации большого количества управляющих организаций. Она сложна технически, т. к. требует сбора, систематизации и анализа большого объема исходных данных.

Мониторинг состояния дорожного покрытия и планирование ремонтов. Это одно из наиболее популярных направлений применения ГИС в дорожных администрациях. Часто одного лишь цветового кодирования участков дорог по срокам ремонта бывает достаточно, чтобы существенно оптимизировать процесс и повысить качество дорожного покрытия в целом. Если же использовать ГИС для интеграции разносторонней информации по дорожной сети (виды / качество покрытия, транспортная нагрузка, даты ремонтов), на ее основе можно построить динамическую модель износа и автоматизировать планирование ремонтов (такая практика в странах Западной Европы уже используется). В базе геоданных удобно хранить и сведения о дорожных знаках, технических средствах ОДД других видов, элементах дорожного обустройства, привязанную к географическим или линейным координатам.

Управление парком ТС. Эта задача стоит перед коммерческими перевозчиками, осуществляющими заказную транспортировку грузов и пассажиров (такси), перед сетевыми торговыми компаниями, а также компаниями, торгующими по каталогам и через интернет-магазины. Цель – снизить общие расходы на транспортировку и ускорить выполнение заказов.

Применительно к деятельности подразделений Госавтоинспекции ГИС позволяет решить следующие задачи:

- повышение оперативности и обоснованности принимаемых решений, направленных на повышение БДД, прогнозирование проводимых мероприятий с целью снижения аварийности;
- создание информационно-аналитического пространства мониторинга общих сведений об аварийности;
- мониторинг показателей аварийности, анализ причин, фактов, времени и анализ мест концентрации ДТП.

Результатом эффективного использования ГИС является тенденция снижения количества ДТП и числа пострадавших в них людей.

Причины концентрации ДТП в том или ином месте могут быть самыми разнообразными, в том числе и не связанными с дорожными условиями и организацией движения. Однако трудности, которые возникают при установлении причин ДТП, не должны исключать этот этап аналитической работы. Отсутствие четко сформулированных, подтверждающих фактическими данными причин существования очагов аварийности, приводит либо к выбору недостаточно эффективных мероприятий, либо к тому, что

мероприятия по совершенствованию дорожных условий вообще не будут реализованы.

Формальных процедур, методов, которые позволяли бы однозначно установить причины существования очага аварийности, не существует. В конечном счете всё зависит от опыта, квалификации и интуиции лица, осуществляющего анализ. Тем не менее практикой выработаны некоторые приемы и требования к организации работы на данном этапе анализа, придерживаясь которых можно избежать наиболее часто встречающихся ошибок.

1 Изучение причин существования очага аварийности должно выполняться группой специалистов из представителей Госавтоинспекции и представителей транспортных, дорожных и коммунальных организаций, отвечающих за содержание, ремонт и реконструкцию дорог и улиц. Такое «комиссионное» изучение позволяет не только обеспечить всестороннее и объективное рассмотрение вопроса, но и сократить время на выполнение следующего этапа – обоснования перечня и очередности проведения мероприятий по ликвидации очага аварийности.

2 Изучение причин существования очага аварийности следует начинать с анализа данных, имеющихся в карточке учета ДТП. Однако необходимо иметь в виду, что эти сведения не всегда позволяют сделать точные и достоверные выводы и заключения. Необходимо максимально использовать данные обо всех ДТП, привлекать к анализу материалы расследования по фактам ДТП, проведенного правоохранительными органами или ведомственными службами безопасности движения.

3 При изучении очагов аварийности желательно использовать крупномасштабную схему с нанесенными местами ДТП и траекториями движения участников.

4 Порядок работы комиссии должен предусматривать изучение причин существования очага аварийности с выездом на место происшествия и подготовку заключительного документа.

Заключительный этап анализа дорожного фактора состоит в разработке и обосновании мероприятий по устранению очагов аварийности – локальных и распределенных. Задача выбора оптимальных мероприятий может быть однозначно решена, если установлены причины концентрации ДТП в очаге, а для каждого мероприятия известны его стоимость и эффективность.

В приложении А приведен перечень основных мероприятий, которые чаще других проводятся для совершенствования дорожных условий и могут предлагаться ГИС для дальнейшего анализа [83].

В Федеральной целевой программе Российской Федерации «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах» [93] приведена методика оценки эффективности данной федеральной целевой программы. В основе методики используется интегральный показатель, учитывающий

величину экономического эффекта от проведения мероприятий программы и определяемый как разность величины предотвращенного ущерба и суммарных затрат на реализацию мероприятий.

В качестве исходных данных используется следующая информация:

- суммарный предотвращенный ущерб в результате реализации мероприятий;
- разность между фактическим значением целевого показателя и значением показателя при развитии «инерционного» сценария или «сценария бездействия» (т. е. при отсутствии мероприятий);
- суммарные затраты на проведение мероприятий.

В качестве целевого показателя могут использоваться один или несколько показателей из нижеперечисленных:

- число лиц, погибших в ДТП;
- социальный риск (число лиц, погибших в ДТП, на 100 тыс. населения);
- транспортный риск (число лиц, погибших в ДТП, на 10 тыс. ТС).

**ITS GIS** [77] – это ГИС с многослойной электронной картой города, обеспечивающая работу с различными геообъектами городской инфраструктуры (закрепленные территории, здания и сооружения, дороги, дорожные знаки, светофоры, опоры освещения и контактной сети городского электротранспорта, остановочные пункты МТС, маршруты ГПТ и др.), специализированные объекты (ДТП и места их концентрации, места дорожных работ и пр.).

Например, модуль учета ДТП (рисунок 2.23) позволяет наблюдать за состоянием аварийности на электронной карте и принимать решения по повышению БДД на наиболее опасных участках дорожной сети.

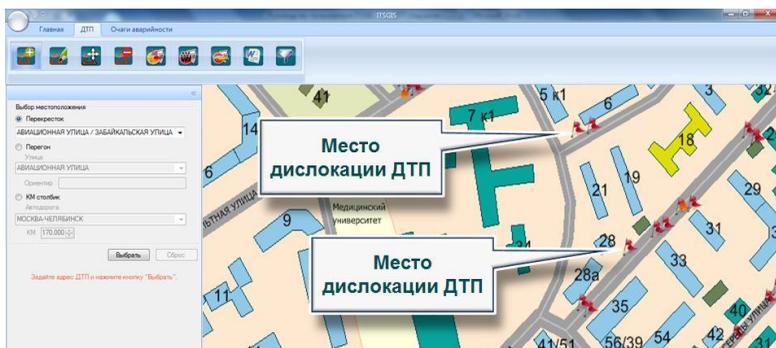


Рисунок 2.23 – Карта с местами совершения ДТП

Программа предоставляет возможность отображения мест совершения ДТП на основе информации из карточки учета ДТП (рисунки 2.24, 2.25),

позволяет выявить «очаги аварийности» в городе, формирует статистические отчеты о различных параметрах аварийности.

Рисунок 2.24 – Окно для ввода информации о ДТП

Дата, время ДТП	Район, Улица, Перекресток	Вид ДТП	Погибло, Ранено	Причина ДТП	Доля тяжести	Тип дороги
09.03.2011 12:58:30	ОКТЯБРЬСКИЙ РАЙОН, БУРГОВА УЛИЦА / НОВОСЁЛОВ УЛИЦА	1. Столкновение	3 / 2	30	2	Трассы
09.03.2011 17:32:04	ОКТЯБРЬСКИЙ РАЙОН, БУРГОВА УЛИЦА / НОВОСЁЛОВ УЛИЦА	1. Столкновение	3 / 2	18	1	Мост, эстакада
09.03.2011 18:30:05	МОСКОВСКИЙ РАЙОН, АВАРАЦИОННАЯ УЛИЦА / ЗАВАЙСКИЙ УЛИЦА / КОНИВА УЛИЦА	3. Наезд на стоящую ТС	0 / 2	Нарушение правил	1	Мост, эстакада
09.03.2011 13:12:21	ОКТЯБРЬСКИЙ РАЙОН, БУРГОВА УЛИЦА / НОВОСЁЛОВ УЛИЦА	3. Наезд на стоящую ТС	3 / 1	32	4	Перекресток регулируемый
02.2010 16:02:25	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / ВВЕДСКАЯ УЛИЦА	1. Столкновение	0 / 3	Наезд	4	Перекресток регулируемый
12.2010 10:41:41	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / СВОБОДЫ УЛИЦА	3. Наезд на стоящую ТС	0 / 2	Семейно	5	Перекресток нерегулируемый
06.2010 14:39:29	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / СВОБОДЫ УЛИЦА	1. Столкновение	0 / 2	Семейно	3	Пешеходный переход, П
12.2010 10:11:03	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / ВВЕДСКАЯ УЛИЦА	4. Наезд на препятствие	0 / 1	Семейно	4	Перекресток регулируемый
26.2010 16:47:36	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / ВВЕДСКАЯ УЛИЦА	3. Наезд на стоящую ТС	0 / 1	Наезд	4	Перекресток регулируемый
03.2011 14:48:16	СОВЕТСКИЙ РАЙОН, ПУШКОВА УЛИЦА / ВВЕДСКАЯ УЛИЦА	2. Столкновение	2 / 0	Семейно	3	Пешеходный переход, П
09.2011 14:19:26	МОСКОВСКИЙ РАЙОН, БУРГОВА УЛИЦА / ЛЕВОБОКИЙ УЛИЦА	3. Наезд на стоящую ТС	1 / 0	Наезд	2	Трассы

Рисунок 2.25 – Сводная ведомость о совершенных ДТП

В программе предусмотрено применение различных фильтров для просмотра ДТП на карте (рисунок 2.26).

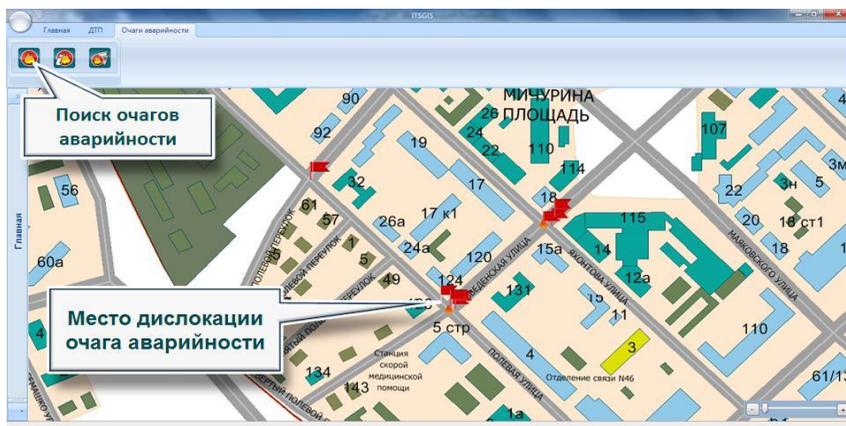


Рисунок 2.26 – Карта с выделенными «очагами» аварийности

Для добавления информации в систему имеется инструмент, построенный на платформах Android и iOS, который позволяет использовать большинство мобильных устройств. С помощью данного инструмента осуществляется подсчет количества ТС разного типа в единицу времени. Предусмотрена возможность импорта данных, хранящихся в других форматах, например из файлов MS Excel.

Программа ITSGIS позволяет визуализировать модуль учета интенсивности ТП).

Слой дорожных знаков (рисунок 2.27) позволяет решать следующие задачи: отображение мест размещения дорожных знаков на электронной карте города; редактирование объектов и информации о них; создание сводных ведомостей и отчетов об установленных объектах.

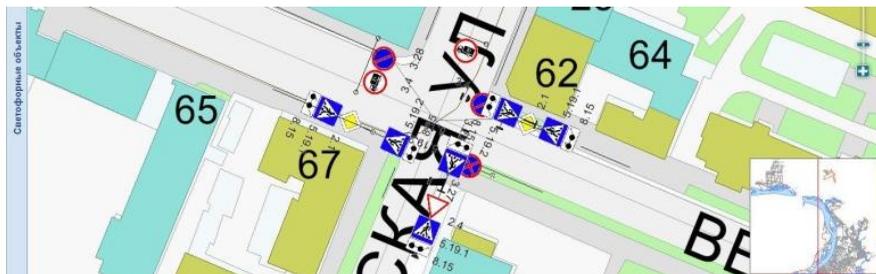


Рисунок 2.27 – Пример отображения на карте дорожных знаков

Для поиска и отображения маршрутов на карте города используется модуль «ITSGIS. Маршруты», позволяющий выполнять операции со следующими видами маршрутов:

- перевозка опасных грузов;
- перевозка детей;
- передвижение на ГПТ;
- оптимальные маршруты на индивидуальном автомобиле.

Система позволяет учитывать особенности каждого из видов маршрутов при их построении, а также различные критерии оптимальности:

- минимальное расстояние;
- минимальное время проезда;
- минимально возможные транспортные задержки;
- минимальная сложность преодоления маршрута;
- минимальная протяженность маршрута с ограничением на сложность преодоления каждого участка маршрута;
- минимальная аварийность.

**ГИС ГАИ Гомеля** [78]. Интерфейс программы позволяет реализовать следующие функции:

- информирование об аварийности в городе на текущий момент и за интересующий период времени на основании карточек учета ДТП;
- топографический анализ информации о концентрации мест ДТП;
- добавление, редактирование, удаление и фильтрацию данных о ДТП, а также создание схем и рисунков;
- организацию поиска объектов;
- прикрепление и просмотр фотографий (рисунок 2.28) и видеоотчетов с места ДТП;
- создание отчетов по интересующему признаку аварийности (рисунок 2.29) с помощью функции «Фильтры».

Создание отчетов по ДТП классифицируется по следующим признакам:

- вид ДТП и тяжесть их последствий;
- вид нарушения ПДД; погодные условия;
- временные периоды (годы, месяцы, дни недели, часы суток);
- наличие и состояние освещения;
- ДТП в состоянии алкогольного опьянения;
- ДТП с участием пешеходов, с участием детей;
- распределение ДТП по возрастным категориям.

Форма добавления ДТП

Участники ДТП

Введите дату (формат: год, месяц, день)

2016-06-14

Введите час Введите минуты

14 40

Улица

Проспект Космонавтов

Пересекаемая улица

Дворникова

Дом

Раненые Погибшие

1 0

Вид покрытия

Асфальтобетонное

Вид ДТП

ТС + пешеход

Тяжесть последствий ДТП

телесные повреждения средней степени тяжести и тяжкие

Вид нарушения

Управление ТС в состоянии опьянения

Характеристики освещенности

светлое время суток (после восх., до зах)

Погодные условия

Ясно

Состояние покрытия

Сухое

Нарушенный пункт ПДД

10.1

Фабула (текстовое описание произошедшего ДТП)

Водитель в состоянии алкогольного опьянения двигался по проспекту Космонавтов, не обращая внимания на сигналы светофоров. В это же время пешеход на зелёный сигнал передвигался по пешеходному переходу. Видимость была отличная, однако из-за алкоголя водитель не увидел вовремя до конца затормозить и нанес пешеходу легкие телесные повреждения.

Число полос

4

Шир. пр. части

14

Шир. обочины

3

Шир. разд. полосы

0

Шир. тротуара

3

Протокол составил

Бахун

Редактировать знак Удалить знак

Рядятер скем ДТП



Рисунок 2.28 – Форма заполнения данных ДТП

Фильтры

ДТП по освещению

Все

светлое время суток (после восх., до зах)

**в темн. время наруж. осв. включено**

в темн. время наруж. осв. не включено или неиспр.

в темн. время наруж. осв. отсутствует

ДТП по тяжести последствий

ДТП по погодным условиям

ДТП по месяцам

ДТП по дням недели

ДТП по часам суток

ДТП по полу

ДТП по причине алкогольного опьянения

ДТП с участием пешеходов

ДТП с участием детей

ДТП по вине водителей по возрастным категориям

Рисунок 2.29 – Создание отчетов с помощью фильтрации информации о ДТП

## 3 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 3.1 Основы математической статистики

**Математическая статистика** – наука для разработки методов регистрации, описания и анализа экспериментальных данных наблюдения массовых случайных явлений. Центральное место в математической статистике занимают *теория оценок* и *теория проверки гипотез*. Основное правило математической статистики гласит: каждое выдвинутое предложение должно быть *оценено* и *проверено* на правдоподобие.

Всякое наблюдение дает какое-то ограниченное представление о явлении в целом, в том числе и об определенной случайной величине. Итогом такого наблюдения, т. е. отбора информации, становится *выборка* – некоторая совокупность результатов наблюдения случайной величины (*генеральной совокупности*), отобранная для исследования по определенному правилу. Таким образом, результаты наблюдения случайного явления дают лишь ограниченную информацию о случайной величине в целом. Поэтому переход от зафиксированного экспериментального факта к выводу и прогнозу далеко не очевиден и нуждается в обосновании. Математическая статистика позволяет по результатам наблюдения частного (выборки) сделать некоторые обоснованные выводы о характеристиках общего (генеральной совокупности).

Общая последовательность применения методов математической статистики (в скобках дается комментарий в современных терминах):

- 1) планирование исследований (планирование эксперимента, определение способа отбора информации);
- 2) конкретизация математико-статистического описания (выбор дисперсионной или регрессионной модели);
- 3) оценка параметров модели (получение точечных и интервальных оценок) и составление их выборочных (эмпирических) распределений;
- 4) изучение согласия между моделью и наблюдениями (адекватность модели оригиналу, проверка критериев согласия в обоснование модели);
- 5) реальное решение задачи посредством оценок параметров и критериев значимости (статистический анализ результатов и разработка выводов).

Первый и третий этапы относятся к процедуре первичной обработки информации, которая начинается с отбора информации, включает построение гистограмм и полигонов частот (если это необходимо для визуальной оценки вида эмпирического распределения) и завершается

расчетом точечных и интервальных оценок. Эти результаты служат исходным материалом для четвертого и пятого этапов – статистического анализа, целью которого является установление статистических закономерностей.

### 3.1.1 Отбор информации

Информация собирается для решения конкретной задачи, поэтому в результате эксперимента исследователь стремится получить лишь ограниченный перечень параметров. Таким образом формулируются первичные требования к отбору информации.

Собранный статистический материал может содержать в себе намного больше информации, чем требовалось при постановке цели. Можно получить значения наблюдаемых параметров с контролируемой погрешностью и с заданной вероятностью, что позволяет сделать первичная обработка информации. Умелое извлечение информации позволяет быстрее достичь требуемого результата, оценить его добротность и адекватность разрабатываемой модели.

Но математическая статистика не может ответить на все вопросы. Во-первых, она способна обработать только ту информацию, которая собрана. Во-вторых, ее методы дают лишь более или менее вероятные (и эту вероятность можно оценить) результаты. Поэтому нет и не может быть математической обработки информации вообще, есть только аппарат для целевых исследований, не возможных без предварительных предположений о модели. За человеком в любом случае остается творческий подход к выбору модели, к способам отбора информации и к формулировке выводов.

Для анализа информации не важно, получена она из натурального или из вычислительного эксперимента на детерминированной или стохастической модели. Основными проблемами сбора и обработки информации являются:

- выбор существенных факторов;
- выбор процедуры отбора информации;
- обеспечение достоверности выводов по результатам анализа.

Проблемы могут быть решены с помощью математического аппарата статистического анализа, излагаемого в последующих параграфах.

Следующий пример иллюстрирует необходимость строгого научного подхода к сбору и обработке информации.

**Пример.** При социологическом опросе 50 человек ответили на вопрос об установке «искусственной неровности» возле детского сада («+» (да) и «-» (нет)):

+ + - + + + + - + - + - - - + + - + - + - - - + + - + + - - - + - + + + - + + - + - - + + +

Подсчитаем количество тех и других знаков: "+" встречается 29 раз, "-" – 21 раз (т. е. ответов «да» на 38 % больше, чем «нет»). Знаков, стоящих на четных местах: «+» – 18, «-» – 7; на нечетных местах: «+» – 11, «-» – 14. Насколько можно доверять общим итогам опроса в таком случае?

В каждой практической задаче можно выдвинуть множество гипотез о происхождении таких разногласий, например, в рассматриваемом примере можно предположить и психологические особенности разных групп респондентов, и недоброкачественный (непредставительный) отбор респондентов, и не добросовестность сборщиков информации и т. д. Можно ли оценить степень их влияния на итоговый результат? Как отобрать «хорошую» информацию? Математическая статистика может дать ответы на все эти вопросы! Конечно, она не сформулирует причины обнаруженного разногласия и не даст непосредственного рецепта для отбора информации. Но она может оценить вероятность правильности выдвигаемых гипотез, определить число факторов, которые оказали решающее влияние на результаты, и оценить вклад каждого из них. С помощью математической статистики можно оценить и добротность самого статистического материала, полученного на основании натуральных или модельных экспериментов.

Отбор информации – важнейшая операция, от правильного проведения которой существенно зависит результат статистического анализа, а следовательно, и выводы исследований. Не стоит заблуждаться относительно якобы объективности данных наблюдения или эксперимента.

Во-первых, результаты таких наблюдений всегда имеют свойства случайной выборки из генеральной совокупности. Так обстоит дело и при контроле технологических процессов, когда проверяются не все характеристики не всех изделий; и при изучении природных явлений, когда не все факторы учитываются и контролируются; и при экспертизе, в которой принимает участие ограниченный круг экспертов.

Во-вторых, информация собирается для определенных целей. Для проверки различных моделей необходима различная информация, иногда одна в другую не преобразуется.

В-третьих, результаты наблюдений фиксируются всегда с какой-то погрешностью: из-за методики измерения, измерительной аппаратуры, округлений и т. п.

Опыт человечества, давно заметившего эти обстоятельства, привел к простейшему приему отбора информации: чем ее больше, тем лучше. В теории измерений повышение объективности данных нашло свое выражение в методике многократного повторения опытов в идентичных условиях.

Однако не всегда есть возможность повторять опыты: это может быть слишком дорогим удовольствием или в принципе невозможно. Потому приходится подробнее рассматривать различные виды отбора информации в эксперименте – получения выборки.

Отбор информации, происходящий помимо воли исследователя, называется естественным в противоположность искусственному. Здесь не

следует путать ситуацию с пассивным или активным экспериментом – естественный отбор предполагает получение информации в виде констатации определенных событий: процесс констатации не зависит от исследователя. Рассмотрим различные виды искусственного отбора.

*Пристрастный* отбор осуществляется по заранее намеченному признаку. Наука до XX века пользовалась именно пристрастным отбором информации: для выявления какой-либо зависимости в изучаемом природном явлении необходимо было избавиться от влияния «посторонних» факторов (например, притяжения Земли, проходящего трамвая и т. п.). Поэтому каждый отдельный опыт ставился в одних и тех же условиях, имевших немаловажное значение и получивших название «чистота эксперимента».

*Случайный* отбор производится с помощью случайных чисел по любой методике.

*Механический* отбор – отбор данных из всей совокупности по какому-либо правилу (например, каждый пятый).

*Типический* отбор – отбор из слоев (частей) всей имеющейся совокупности. Так делается отбор материала из отдельных партий продукции для технического контроля.

*Пропорциональный* отбор – частный случай типического отбора, когда из каждого слоя отбирается часть, пропорциональная объему слоя.

При *репрезентативном* отборе получается представительная выборка, достаточно полно характеризующая всю совокупность с точки зрения влияния важных и существенных факторов. Безусловно, к такому отбору следует стремиться, однако для оценки степени репрезентативности необходимы именно те характеристики, которые являются результатом конечного анализа отобранной информации. Поэтому в таких областях, как политическая социология или экология, где цена принимаемого решения чрезвычайно высока, проводится специальный статистический эксперимент для оценки репрезентативности различных выборок и построения оптимальной из них по определенному критерию.

Для получения наиболее представительных оценок необходимо объединять данные целого ряда различных объектов. Допустимость такого объединения основывается на проверке гипотезы однородности статистического материала. Для оценок доверительных интервалов и проверки гипотез широко используется распределение  $\chi^2$ .

С помощью математической статистики определяется также необходимый объем испытаний для оценки надежности с заданной точностью и проверяется влияние различных факторов (дисперсионный анализ) и взаимное влияние случайных параметров друг на друга (корреляционный анализ). Наконец, математическая статистика позволяет планировать испытания и исследования так, чтобы получить максимальную

информацию при минимальных затратах (теория экстремальных экспериментов).

**Порядок обработки информации.** С точки зрения объема априорных сведений, задачи статистической обработки сводятся к двум вариантам.

1 Вид функции распределения наблюдаемой СВ известен априори. В этом случае задача статистической обработки – получение оценок показателей надёжности с учётом вида функции распределения и характера имеющегося статистического материала.

2 Вид функции распределения наблюдаемой СВ неизвестен или известен лишь предположительно. В этом случае принимается некоторая гипотеза о виде функции распределения и оцениваются ее параметры. Затем проводится проверка, не противоречат ли данные наблюдений принятой гипотезе. При положительных результатах этой проверки приступают к заключительному этапу обработки.

В такой постановке процесс статистической обработки более трудоемок и состоит из следующих этапов: построение вариационного ряда; построение гистограммы; принятие гипотезы о виде закона распределения; оценка точечных значений параметров для принятия функции распределения; проверка непротиворечивости результатов наблюдений принятой гипотезе; оценка интервальных значений параметров функций распределения и показателей надёжности (при положительных результатах предыдущего этапа).

В случае отрицательного результата процедуры проверки гипотезы процесс статистической обработки повторяется начиная с этапа принятия гипотезы; при другом предположении о виде функции распределения в некоторых случаях приходится возвращаться к этапу дальнейшего накопления данных.

### 3.1.2 Требования к точечным оценкам и объёму выборок

В процессе любого эксперимента, в том числе и вычислительного, приходится иметь дело с теми или иными значениями наблюдаемых параметров. Определение этих значений с достаточной точностью невозможно без многократных повторений опытов и специальной процедуры их обработки. Простейшим примером этого является определение средней величины результатов однотипных измерений. В более сложных случаях приходится вычислять значения ненаблюдаемых параметров по значениям наблюдаемых. Определение значения некоторого параметра наблюдаемого объекта по экспериментальным данным носит название статистической точечной оценки.

В первую очередь для расчетов и анализа любой СВ  $\xi$  необходимо получить точечные оценки параметров закона ее распределения, основными из которых являются *математическое ожидание  $M$*  и *дисперсия  $\sigma^2$* .

Поэтому изучение статистических методов точечных оценок сосредоточено на получении оценок именно этих величин.

Наиболее простым методом нахождения точечных оценок является **метод моментов**, предложенный К. Пирсоном. Он заключается в приравнивании начальных или центральных моментов генеральной совокупности соответствующим моментам выборки.

Но если в нашем распоряжении  $k$  выборок (например, полученных  $k$  исследователями), то не ясно, какую из выборочных средних надо принять за оценку математического ожидания. Более того, эти выборочные средние сами по себе случайные величины, так как и выборки и условия экспериментов могут случайно меняться. Тогда возникает вопрос: как это надо считать. Ведь объем информации в разных выборках различен!

Способ определения точечной оценки  $\lambda^*$  истинного значения параметра  $\lambda$  определяется теми ее свойствами, которые необходимо обеспечить в конкретном случае. Математическая статистика рассматривает следующие свойства точечных оценок.

*Несмещенность* – свойство точечной оценки  $\lambda^*$ , при котором ее математическое ожидание равно истинному значению  $\lambda$  оцениваемого параметра. То есть несмещенная точечная оценка определяет искомый параметр без систематической ошибки: отклонения, например, от генеральной средней (математического ожидания) распределены симметрично.

*Состоятельность* – свойство точечной оценки  $\lambda^*$ , при котором с возрастанием объема выборки  $N$  она **стремится** по вероятности к истинному значению  $\lambda$  оцениваемого параметра:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P(|\lambda^* - \lambda| < \varepsilon) = 1,$$

где  $P$  – вероятность;

$\varepsilon$  – произвольное сколь угодно малое число.

В специальном курсе математической статистики доказывается, что выборочная средняя  $\lambda^*$  является состоятельной оценкой математического ожидания.

Эффективной называется точечная оценка  $\lambda^*$ , имеющая при заданном объеме выборки  $N$  наименьшую дисперсию. Естественно, что из нескольких состоятельных оценок следует выбирать наиболее эффективную. Препятствием выявления этого свойства может стать необходимость знания закона распределения изучаемой случайной величины. Поэтому далеко не всегда удастся обеспечить эффективность найденной точечной оценки. Можно показать, что выборочное среднее является эффективной оценкой математического ожидания.

Необходимость получения состоятельных, эффективных и достаточных оценок в случаях неизвестных законов распределения привела к разработке

приемов получения робастных оценок и критериев, не зависящих от вида закона распределения или, по крайней мере, устойчивых к его нарушениям. Однако эти приемы в основном имеют эмпирическое происхождение, связаны с удачными решениями определенных задач, а в общем случае теоретически не обоснованы, т. е. не гарантируют получение результата. Простейшие практические ограничения снизу на объем статистического материала  $N \geq 30$ .

Это ограничение касается не столько обеспечения состоятельности и эффективности оценки, сколько достаточности степеней свободы выборки. *Число степеней свободы* для системы  $n$  случайных величин называется число  $n$  этих величин минус число линейных связей между ними. При определении выборочного среднего – первой числовой характеристики (связи) – в качестве числа степеней свободы используется объем выборки  $N$ . При вычислении второй характеристики – дисперсии – число степеней свободы необходимо уменьшить на 1 за счет использования связи в виде выборочного среднего.

В таблице 3.1 приведены формулы для вычисления требуемых объемов выборок из слоев, отобранных различными способами, и выборочного среднего всей совокупности с его дисперсией.

**Таблица 3.1 – Формулы для вычисления требуемых объемов выборок**

| Способ отбора                            | Объем  | Математическое ожидание   | Дисперсия  |
|--|--|---|--|
| Генеральная совокупность                 | $N$  | $\sum_{j=1}^k \mu_j \alpha_j$   | $\sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j^2 + \sum_{j=1}^k \mu_j (\alpha_j - \sum_{i=1}^k \mu_i \alpha_i)^2$    |
| Расслоенный отбор                        | Требуемый $N_i$  | Выборочное среднее  | Дисперсия выборочного среднего   |
| Произвольный                             | $N$  | $\sum_{j=1}^k \mu_j \bar{x}_j$  | $\sum_{j=1}^k \mu_j^2 \frac{\sigma_j^2}{N_j} (1 - \alpha_j)$                                       |
| Пропорциональный                         | $\mu_j N$  | $\sum_{j=1}^k \mu_j \bar{x}_j$  | $\frac{1 - \alpha}{N} \sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j^2$   |
| Оптимальный (минимальная дисперсия $D$ ) | $\frac{\mu_i \sigma_i}{\sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j} N$ | $\sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j \sum_{j=1}^k \frac{\mu_j \bar{x}_j}{\sigma_j}$ | $\frac{\left( \sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j \right)^2}{N} - \frac{\sum_{j=1}^k \mu_j \sigma_j^2}{M}$ |

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| Оптимальный<br>(минимальная<br>стоимость $C$ ) | $\frac{\mu_i \sigma_i}{\sum_{j=1}^k \frac{\mu_j \sigma_j}{\sqrt{c_j}}} \frac{N}{\sqrt{c_i}}$ | $\sum_{j=1}^k \frac{\mu_j \sigma_j}{\sqrt{c_j}} \sum_{j=1}^k \frac{\mu_j \bar{x}_j}{\sigma_j} \sqrt{c_j}$ | $\frac{\left( \sum_{j=1}^k \frac{\mu_j \sigma_j}{\sqrt{c_j}} \right)^2}{N} \sum_{j=1}^k \mu_j c_j (1 - \alpha_j)$ |
|--|--|---|---|

В таблице 3.1 использованы следующие обозначения:  $\mu_j$  – центральный момент  $j$ -го слоя;  $\bar{x}$  – выборочное среднее;  $k$  – количество выборок;  $N$  – объем выборки;  $\alpha = \frac{N}{M}$ ,  $\mu_i = \frac{M_i}{M}$ ,  $\alpha_j = \frac{N_j}{M}$ .

Стоимость эксперимента

$$C = C_0 + \sum_{j=1}^k c_j N_j,$$

где  $C_0$  – накладные расходы;

$c_j$  – стоимость одного наблюдения в  $j$ -м слое.

### 3.1.3 Проверка статистических гипотез

В многообразной практической деятельности человека процедура выдвижения и проверки гипотез имеет самые различные формы от простейших бытовых обсуждений (насколько разбавлена сметана недобросовестным продавцом) до расчетов стоимости эффекта и потерь (какова средняя стоимость ремонта аварийного автомобиля – для страховой компании). Наиболее обоснованной из этих форм является математическая теория проверки статистических гипотез.

В математической статистике существует жесткое правило: любое предположение о свойствах распределения некоторой величины, основанное на выборочных данных, должно быть проверено. Статистическая проверка не может доказать истинность (это не может сделать вообще никто), но может указать с некоторой долей уверенности на наличие или отсутствие признаков опровержения данного суждения. Дальше уже дело человека – принять или отвергнуть предлагаемую гипотезу на основании такого статистического вывода.

**Проверка однородности статистического материала.** Для более точного определения показателей надежности и установления видов законов распределения наработки на отказ и других случайных величин необходимо объединять статистические данные, собранные на различных объектах промышленных предприятий и энергосистем. В связи с этим возникает задача проверки однородности статистического материала.

Помимо выборки  $x_1, x_2, \dots, x_n$  имеются также взаимно независимые величины  $x_1', x_2', \dots, x_m'$ , распределенные одинаково и непрерывно, но принадлежащие другой выборке. Объединим эти совокупности, расположив их в порядке возрастания значений  $x_1'', x_2'', \dots, x_{n+m}$ . Обозначим функцию эмпирического распределения как  $G_m(x)$ , соответствующую выборке  $x_1', x_2', \dots, x_m'$ .

Основная гипотеза  $H_0$ , подлежащая проверке, заключается в предположении того, что обе выборки извлечены из одной и той же совокупности, а значения функции распределения величин  $x$  и  $x'$  одинаковы.

Для проверки нулевой гипотезы используется критерий Вилкоксона, основанный на числе инверсий, под которыми понимается следующее: если какому-либо значению  $x$  предшествует некоторый  $x'$ , тоговорят, что эта пара дает инверсию.

Гипотеза  $H_0$  отвергается, если сумма инверсий  $u$  превосходит выбранную в соответствии с уровнем значимости границу, определяемую из расчета, что при объемах  $n > 10$  и  $m > 10$  выборок число инверсий распределено нормально с центром  $M(u) = 0,5mn$  и дисперсией  $D(u) = (1/12)mn(m + n + 1)$ .

**Пример.** Собраны статистические сведения о средней повреждаемости дорожного покрытия на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Исходные данные двух объектов исследования

| Обозначение данных | Месяц |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    | я     | ф   | м   | а   | м   | и   | и   | а   | с   | о   | н   | д   |
| $x$                | 0,8   | 1,9 | 3   | 3,5 | 3,8 | 2,5 | 1,7 | 0,9 | 1   | 2,3 | 3,3 | 3,4 |
| $x'$               | 1,4   | 2,1 | 3,1 | 3,6 | 2,7 | 1,8 | 1,1 | 0,2 | 1,6 | 2,8 | 4   | 4,7 |

Требуется определить, можно ли считать, что между данными о повреждаемости дорожных покрытий, обслуживаемых дорожными предприятиями двух городов, нет систематических расхождений и что они имеют одинаковые систематические погрешности, т. е. нужно проверить нулевую гипотезу  $H_0$ .

*Решение.* Располагаем данные в общую последовательность в порядке возрастания повреждаемости (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Обобщенный вариационный ряд

|      |     |     |     |      |      |      |     |      |     |      |      |
|------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|------|
| $x'$ | $x$ | $x$ | $x$ | $x'$ | $x'$ | $x'$ | $x$ | $x'$ | $x$ | $x'$ | $x'$ |
| 0,2  | 0,8 | 0,9 | 1   | 1,1  | 1,4  | 1,6  | 1,7 | 1,8  | 1,9 | 2,1  | 2,3  |

Окончание таблицы 3.3

|     |      |      |     |      |     |     |     |      |     |      |      |
|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|
| $x$ | $x'$ | $x'$ | $x$ | $x'$ | $x$ | $x$ | $x$ | $x'$ | $x$ | $x'$ | $x'$ |
| 2,5 | 2,7  | 2,8  | 3   | 3,1  | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6  | 3,8 | 4    | 4,7  |

Число инверсий для  $x$

$$u = 1 + 1 + 1 + 4 + 5 + 6 + 6 + 8 + 9 + 9 + 9 + 10 = 69.$$

Находим математическое ожидание и дисперсию:

$$M(u) = 0,5 \cdot 12 \cdot 12 = 72; \quad D(u) = (1/12) \cdot 12 \cdot 12 (12 + 12 + 1) = 300;$$

$$\sigma = \sqrt{D(u)} = 17,3.$$

Задавшись уровнем значимости 5 % и учитывая, что городские дорожные предприятия являются равноправными, строим критическую область больших по абсолютной величине отклонений, используя значение  $t_{0,05} = 1,96$ .

Критическая область для гипотезы  $H_0$ :

$$u \leq 72 - 1,96 \cdot 17,3 \approx 38; \quad u \geq 72 + 1,96 \cdot 17,3 \approx 106$$

Полученное значение инверсии  $u = 69$  не лежит в критической области, поэтому гипотеза  $H_0$  не опровергается и нет оснований считать повреждаемость дорожных покрытий, обслуживаемых дорожными предприятиями двух городов, существенно различающимися между собой.

**Проверка гипотез о законе распределения СВ.** В качестве выдвигаемых гипотез обычно выступают предположения о свойствах закона распределения генеральной совокупности. Таковыми могут быть предположения о значениях параметров  $\lambda$  закона распределения (для их проверки применяются параметрические критерии), а также предположения о

непараметризуемых свойствах распределения (для них служат непараметрические критерии).

Первые требуют знания общего вида закона распределения, но вторые оказываются менее эффективными. В качестве критерия соответствия понимается достижение определенного значения функции правдоподобия полученной выборки: если выборка попадает в область малого правдоподобия, то присутствуют признаки опровержения гипотезы – есть основания отвергнуть эту гипотезу. В противоположном случае нет оснований отвергнуть гипотезу.

Нулевой ( $H_0$ ) называют выдвинутую гипотезу. Альтернативной ( $H_a$ ) называется гипотеза, конкурирующая с нулевой гипотезой (если отвергается нулевая гипотеза, то принимается альтернативная).

Однако суждения о реальности весьма ограничены, поэтому при проверке статистических гипотез по выборочным данным всегда существует возможность принятия ложного решения. Это объясняется тем, что объем выборки конечен, поэтому нельзя точно определить ни вид функции распределения, ни значения параметров. Возможная ошибка в наших выводах предполагает не два, а четыре исхода:

- 1) гипотеза верна и не отвергается согласно критерию (правильный вывод);
- 2) гипотеза неверна и отвергается согласно критерию (правильный вывод);
- 3) гипотеза верна, но отвергается согласно критерию (ошибка I рода);
- 4) гипотеза неверна, но не отвергается согласно критерию (ошибка II рода).

Вероятность ошибки I рода, т. е. вероятность ошибки при условии верности гипотезы, принято обозначать  $\alpha$  и называть уровнем значимости критерия. Для оценки гипотезы необходимо назначать уровень значимости – максимальное значение вероятности, которое принимается за практическую невозможность получения конкретной выборки с гипотетическими свойствами. Тогда вероятность правильного принятия проверяемой гипотезы (1-го исхода) равна  $1 - \alpha$ .

Вероятность ошибки II рода, т. е. вероятность ошибки при условии неверности гипотезы, может быть оценена только после конкретизации альтернативной (конкурирующей) гипотезы, поскольку в этом случае решающее значение имеет «отдаленность» исходной гипотезы от ее альтернативы. Эту вероятность принято обозначать  $\beta$ . При этом вероятность правильного отвергания проверяемой гипотезы (2-й исход) равна  $1 - \beta$ , эта величина называется мощностью критерия.

Будем рассматривать только один вид статистических критериев – статистические критерии значимости. Это значит, что будет заранее фиксироваться вероятность совершения ошибки первого рода, тогда не будет необходимости в нахождении ошибки второго рода  $\beta$ . Например,

если при отклонении нулевой гипотезы  $H_0$  на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  мы совершаем ошибку первого рода (считаем правильную нулевую гипотезу  $H_0$  ложной), то в среднем ошибемся в 5 из 100 случаев применения данного статистического критерия значимости.

### 3.1.4 Точность оценки. Доверительный интервал

*Интервальной* называют оценку, которая определяется двумя числами – концами интервала. Пусть для параметра  $a$  СВ получена оценка  $a^*$ . Необходимо оценить возможную при этом ошибку;  $\delta$  – точность оценки.

*Надежностью* (доверительной вероятностью) называют вероятность, с которой выполняется неравенство  $|a - a^*| < \delta$ :

$$P(|a - a^*| < \delta) = \beta.$$

Тогда  $P(a^* - \delta < a < a^* + \delta) = \beta$ .

Ширина доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки, а доверительная вероятность  $\beta$  – достоверность оценки. Чем меньше  $\beta$ , тем шире доверительный интервал. Обычно  $\beta$  принимается в пределах 0,8–0,99 [12].

## 3.2 Основы многомерного статистического анализа

### 3.2.1 Классификация задач многомерного статистического анализа

На практике часто встречаются объекты с двумя и более СВ, и при разработке моделей сложных систем необходимость многомерного статистического анализа становится очевидной. В таких моделях приходится изучать не только характерные особенности отдельных случайных факторов, но и их взаимодействие. При этом возможны различные подходы к выявлению и оценке такого взаимодействия.

Объект исследования можно представить в виде «черного ящика» с «входами» и «выходами» (рисунок 3.1), среди которых различают:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  – вектор входных контролируемых переменных, которыми можно управлять в исследовании;

$Z = (z_1, z_2, \dots, z_p)$  – вектор входных контролируемых переменных, которыми невозможно управлять в исследовании;

$E = (e_1, e_2, \dots, e_r)$  – вектор входных неконтролируемых и неуправляемых переменных (*шум*);

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_g)$  – вектор выходных переменных.

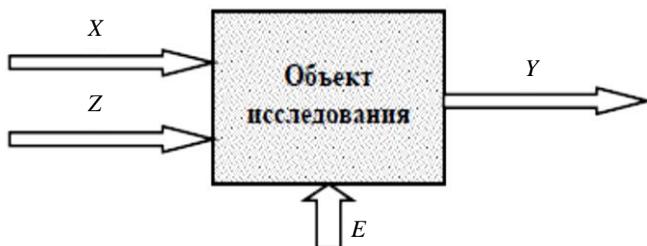


Рисунок 3.1 – Объект исследования в виде «черного ящика»

Переменные  $X$ ,  $Z$  называются факторами. Если фактор принимает фиксированные, детерминированные значения, то они называются *уровнями фактора*. Факторы  $Z$  могут быть случайными. Переменные  $E$  тоже случайные, хотя могут и не описываться законами распределения (могут быть ни стохастического, ни вероятностного вида), но происхождение их не является предметом исследования, они связаны с погрешностями эксперимента или моделирования. Если факторы  $Z$  случайны, то и выходные переменные  $Y$  необходимо рассматривать как случайные. В частности, такого рода случайности могут быть вызваны наложением шума  $E$ .

Рассмотрим некоторые виды задач статистического анализа, которые могут возникнуть при изучении сложных *многофакторных систем*.

- 1 Существует ли связь между отдельными факторами.
- 2 Если между факторами есть связь, то насколько она тесная.
- 3 Если между какими-то факторами есть связь, то какой функцией ее можно представить.
- 4 Какие входные факторы оказывают на определенные выходные наибольшее влияние.
- 5 Какие входные факторы можно отбросить из процесса изучения на основании их слабого, сравнимого с шумом влияния.
- 6 Существуют ли неучтенные факторы, которые необходимо рассматривать ввиду их существенного влияния на выходные.
- 7 Существуют ли обобщенные факторы, которыми можно заменить несколько рассматриваемых.
- 8 Как связаны между собой зашумленные факторы.
- 9 Каковы характеристики шума.
- 10 Как выделить «полезную» информацию из зашумленной.

Перечисленные задачи можно решить с помощью методов многомерного статистического анализа, включающего в себя:

- корреляционный анализ (КА);
- регрессионный анализ (РА);
- конфлюэнтный анализ;

- дисперсионный анализ (ДА);
- факторный анализ (ФА);
- теорию фильтрации.

Каждый из этих разделов – совокупность методов и приемов математической статистики. Исторически так сложилось, что четкого разграничения указанных разделов и методов между разделами не существует. Выбор методов диктуется лишь конкретной практической задачей. Например, задачи 1, 2 вышеприведенного списка решаются методами КА, задача типа 3 – РА. Задачи 4–6 относятся к задачам ДА, 7 – ФА, а 8, 9 – конфлюэнтного. Теория фильтрации позволяет решить задачи типа 10 и частично 9.

Каждый из перечисленных видов статистического анализа, по сути, предназначен для обоснования той или иной статистической математической модели изучаемого оригинала. Корреляционный анализ позволяет получить корреляционную модель, регрессионный анализ – регрессионную, конфлюэнтный – конфлюэнтную, дисперсионный – дисперсионную.

Возможность решения перечисленных задач вытекает из физического смысла основных числовых характеристик СВ: дисперсии или среднего квадратического отклонения и коэффициента корреляции.

Конечной целью и основной *задачей корреляционного анализа* и является построение совместного закона распределения системы СВ.

Задачу *регрессионного анализа* составляет исследование вида и формы корреляции: какой функцией можно представить связь СВ – регрессию – уравнение для условной средней. Некоторые авторы считают регрессионный анализ частью корреляционного, некоторые считают его методы самостоятельными. Однако эти методы могут предложить лишь то или иное выражение связи, они не отвечают на вопрос о наличии собственно функциональной зависимости – такая постановка вопроса возможна только в профессиональном плане исследования объекта, а не в формальном математическом.

Задачей *конфлюэнтного анализа* является изучение структуры СВ, находящихся в некотором взаимодействии.

Наибольшее развитие у основоположника многомерного статистического анализа Р. Фишера получил *дисперсионный анализ*, основной задачей которого является сравнение дисперсий разных СВ или различных способов вычисления дисперсий.

*Факторный анализ* решает задачу поиска минимального числа обобщенных факторов, заменяющих исходное множество.

Задачей *теории фильтрации* является выделение исходного сигнала из искаженной или неполной информации.

### 3.2.2 Регрессионный анализ

В практике инженерных и научных исследований результат испытания часто характеризуется набором СВ, т. е. многомерной СВ. Например, влияние погодных условий характеризуется температурой, давлением, влажностью, направлением и скоростью ветра.

Многомерные СВ характеризуются многомерными законами распределения. Наряду с числовыми характеристиками, применимыми для одномерных СВ (математическим ожиданием, дисперсией и др.), многомерные СВ определяются дополнительными числовыми характеристиками, описывающими зависимость между ее компонентами.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением двумерной СВ  $(X, Y)$ , компоненты  $X$  и  $Y$  которой фактически являются одномерными СВ.

Зависимость между СВ, при которой каждому значению  $x$  СВ  $X$  однозначно ставится в соответствие единственное значение  $y$  СВ  $Y$ , называется *функциональной*. Например, зная напряжение  $U$  на участке электрической цепи сопротивлением  $R$ , можно однозначно определить величину тока ( $I = U/R$ ); зная скорость движения поезда  $v$ , можно однозначно определить время  $T$  его движения по перегону.

Однако часто на практике одному значению СВ  $X$  может соответствовать не одно, а множество значений СВ  $Y$ , характеризуемых для каждого  $X = x$  условным распределением с плотностью вероятностей  $f(y|X=x)$ . Такая зависимость называется *статистической*. Примером статистической зависимости является зависимость величины потребления электроэнергии на перегоне электровозом ( $Y$ ) от массы поезда ( $X$ ), т. к. одному значению массы состава могут соответствовать различные значения потребления электроэнергии (кроме массы состава на электропотребление влияют скорость движения, профиль и состояние пути, состояние подвижного состава, направление и скорость ветра и прочие факторы).

Таким образом, при фиксированном значении  $x_i$  влияющей величины  $X$  значения зависимой величины  $Y$  по-прежнему являются случайными и определяются условным законом распределения (при условии, что  $X = x_i$ ). Изменение условного закона распределения СВ  $Y$  при изменении значения  $X$  может проявляться при изменении как вида распределения (рисунок 3.2, а), так и его числовых характеристик (рисунок 3.2, б), например, математического ожидания.

Если условный закон распределения (например,  $f(y|X=x)$ ) одной из величин не изменяется при изменении значения другой СВ  $X$ , то такие величины называются *независимыми*. Например, температура воздуха  $Y$  завтра в полдень не зависит от скорости движения автомобиля  $X$ . Независимыми являются СВ, не связанные причинно-следственными связями.

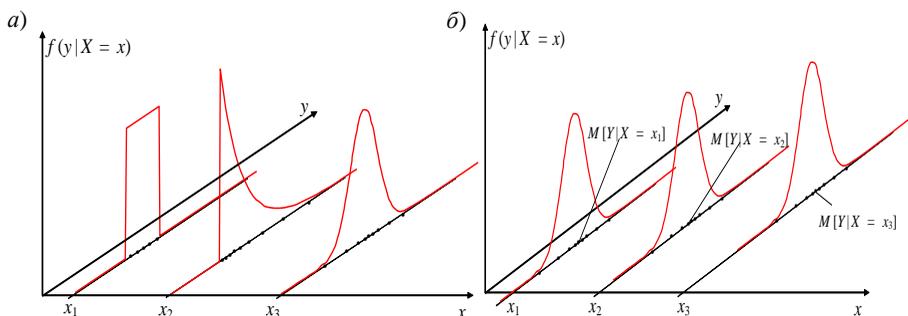


Рисунок 3.2 – Примеры статистической зависимости между СВ:  
с изменением вида закона распределения (а),  
с изменением только математического ожидания (б)

Исследование зависимостей между СВ является наиболее часто используемым приложением математической статистики и применяется главным образом для предсказания значения одной СВ по значению другой. Чаще всего ограничиваются изучением *регрессионной* зависимости, которая каждому значению одной СВ ставит в соответствие условное математическое ожидание другой СВ  $M[Y|X=x]$ . Предметом *регрессионного* анализа является нахождение вида уравнения регрессионной зависимости между случайными величинами. Предметом же *корреляционного* анализа является оценка тесноты связи между СВ, а также оценка качества описания зависимости выбранным уравнением регрессии.

*Регрессионный анализ* предназначен для решения единственной задачи получения теоретического уравнения регрессии, вид которого задается, исходя из особенностей изучаемой системы СВ. *Регрессия* – функциональная зависимость, *аппроксимирующая* (заменяющая) статистическую зависимость средних значений рассматриваемых факторов (переменных).

Рассмотрим последовательные шаги решения общей задачи регрессионного анализа.

1 Задание вида линии регрессии – важнейший этап. Основные соображения о виде функции должны диктоваться только реальными физическими свойствами изучаемого явления, например, возрастание/убывание, выпуклость/вогнутость, наличие замечательных точек (известные значения координат отдельных точек, экстремумов и перегибов), асимптот, периодов, свойств симметрии, гладкости и т. д. И только дополнительными мотивами могут служить графические построения выборочной корреляционной зависимости.

2 Вычисление выборочных оценок параметров предполагаемого теоретического закона распределения:  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $r_{xy}$ .

3 Проверка гипотезы о равенстве нулю коэффициента корреляции. Этот шаг нужен для выяснения вопроса о необходимости дальнейшего анализа. Если исследуемые случайные величины по результатам выборки можно считать некоррелированными, то бесполезно пытаться строить регрессию и следует прекратить анализ или вернуться к пункту 1.

4 Проверка гипотез о законах распределения исследуемых случайных величин. Это необходимо для метода наибольшего правдоподобия и может быть проделано с помощью критерия согласия Пирсона.

5 Для отыскания параметров линии регрессии используется метод наибольшего правдоподобия, дающий несмещенные их оценки и не предъявляющий каких-либо требований к законам распределения СВ. Правда, применить этот метод можно только тогда, когда последние известны. Поэтому и необходим предыдущий шаг.

6 Уравнение регрессии можно считать окончательным только после подтверждения дисперсионным анализом, т. е. «погрешность» замены статистической регрессии аппроксимирующей зависимостью. Проверка производится по критерию Фишера с  $(k - v, N - k)$  степенями свободы.

Пусть дана выборка значений двумерной СВ  $(X, Y) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)\}$ , где  $n$  – объем двумерной выборки. Первым шагом в построении эмпирического уравнения регрессии между СВ является графическое отображение значений двумерной случайной величины в виде точек  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  на плоскости  $x$ - $y$ , называемое *диаграммой рассеяния* (корреляционным полем) (рисунок 3.3).

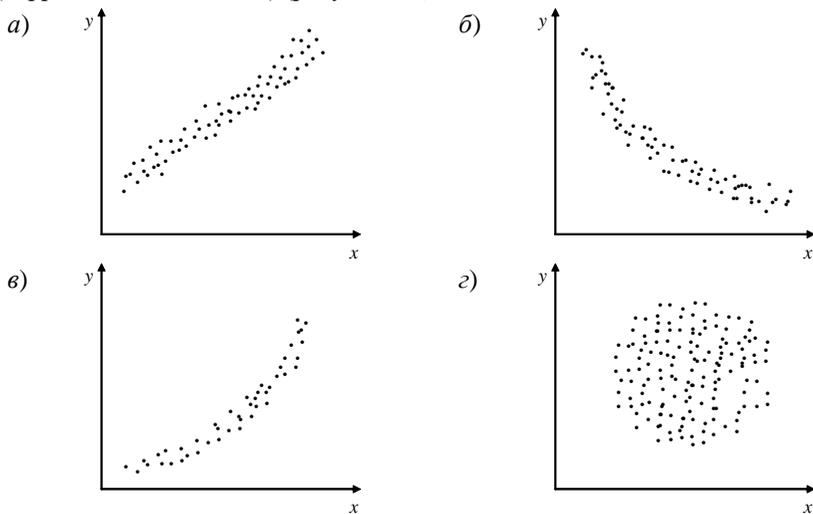


Рисунок 3.3 – Диаграмма рассеяния, соответствующая линейной (а), экспоненциальной (б), параболической (в) регрессионной зависимости и отсутствию регрессионной зависимости (г)

Визуальный анализ диаграммы рассеяния и предметная постановка задачи (физический смысл рассматриваемых величин) позволяет сделать предположение о виде уравнения регрессии. Если предполагается, что зависимость между СВ  $X$  и  $Y$  линейна (рисунок 4.4, а), то теоретическая модель регрессионной зависимости между СВ задается уравнением

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $y_i$  –  $i$ -е выборочное значение СВ  $Y$ ;

$\beta_0, \beta_1$  – параметры линейной регрессии, требующие определения;

$x_i$  –  $i$ -е выборочное значение СВ  $X$ ;

$e_i$  – ошибка, вызванная отклонением  $i$ -го наблюдения СВ  $Y$  от условного среднего  $M[Y|X=x_i]$ . Ошибки  $e_i$  обуславливаются упрощением вида зависимости  $Y$  от  $X$  (без учёта всех факторов), а также возможной ошибкой в выборе формы регрессии (может описываться другим уравнением).

**Метод наименьших квадратов.** Для оценивания параметров уравнения регрессии  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  наиболее часто применяется метод наименьших квадратов (МНК). Идею МНК продемонстрируем на примере определения параметров линейной регрессионной зависимости.

Для случая линейной регрессии оценки параметров  $\hat{\beta}_0$  и  $\hat{\beta}_1$  получаются минимизацией по  $\hat{\beta}_0$  и  $\hat{\beta}_1$  суммы квадратов отклонений  $e_i$  выборочных значений СВ  $Y$  от значений, предсказываемых уравнением регрессии  $Y$  на  $X$ . Полученные значения  $\hat{\beta}_0$  и  $\hat{\beta}_1$  называются оценками параметров регрессии и вычисляются по формулам

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

В результате оценка уравнения линейной регрессии (эмпирическое уравнение линейной регрессии, прямая, полученная МНК) будет иметь вид

$$\bar{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x.$$

Метод наименьших квадратов применим для оценивания параметров уравнений регрессии произвольного вида (гиперболической, параболической, экспоненциальной, логарифмической и т. д.).

**Пошаговый регрессионный анализ.** В случае, если по виду диаграммы рассеяния сложно выдвинуть предположение о виде регрессионной зависимости, рекомендуется использовать пошаговый регрессионный анализ. Для этого уравнение регрессии выбирают как можно более сложным, содержащим большое количество слагаемых. Например,

$$\bar{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 / x + \hat{\beta}_2 x + \hat{\beta}_3 x^2 + \hat{\beta}_4 x^3 + \hat{\beta}_5 e^x.$$

Стандартная пошаговая процедура позволяет в записанном уравнении регрессии выбрать те слагаемые, совокупность которых достаточно качественно предсказывает среднее значение зависимой СВ, и отбросить те слагаемые, которые существенно не улучшают предсказание СВ  $Y$ .

Особенно полезен пошаговый регрессионный анализ в случае множественной регрессии, когда СВ  $Y$  зависит от нескольких независимых СВ  $X_1, X_2, X_3$  и т. д. При этом пошаговая процедура позволяет из множества влияющих (независимых) СВ исключить несущественные и тем самым упростить уравнение регрессии (данную процедуру можно реализовать в программах статистической обработки данных, например, Statistica [98] или Statgraphics).

### 3.2.3 Корреляционный анализ

Помимо предположения о форме уравнения регрессионной зависимости между случайными величинами и нахождения параметров уравнения исследователю необходимо оценить, насколько удачно выбранная регрессионная модель объясняет существующую зависимость между исследуемыми СВ.

**Корреляционный анализ** – группа статистических методов установления формы и тесноты корреляционной связи между факторами.

*Коэффициент корреляции.* Основной числовой характеристикой, определяющей тесноту линейной связи между двумя случайными величинами, является коэффициент корреляции

$$r = \frac{M[XY] - M[X]M[Y]}{\sigma[X]\sigma[Y]},$$

где  $M[XY]$  – математическое ожидание произведения СВ  $X$  и  $Y$ .

Коэффициент корреляции является безразмерной величиной и может принимать значения из интервала  $-1 \leq r \leq 1$ . Для линейно независимых СВ  $X$  и  $Y$  коэффициент корреляции равен нулю. Чем теснее линейная зависимость между двумя СВ, тем больше коэффициент корреляции отличается от нуля. Экстремальные значения « $-1$ » или « $1$ » коэффициента корреляции соответствуют линейной функциональной зависимости между двумя СВ (отрицательной и положительной соответственно). Положительная зависимость указывает на увеличение значения одной величины при увеличении значения другой. Например, стаж и производительность труда рабочих; время подготовки к экзамену и полученная оценка. Для отрицательной зависимости характерно уменьшение значения одной из величин при увеличении значения другой величины.

Таким образом, можно говорить, что коэффициент корреляции характеризует тесноту линейной регрессионной зависимости между двумя СВ, т. е. близость ее к линейной функциональной зависимости. По заданной двумерной выборке оценку коэффициента корреляции  $\hat{r}$  можно найти по формуле

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}.$$

*Коэффициент детерминации.* Для характеристики качества описания зависимости между двумя СВ произвольным уравнением регрессии используется коэффициент детерминации  $\hat{R}^2$ . Чем лучше линия регрессии аппроксимирует точки на диаграмме рассеяния, тем больше значение  $\hat{R}^2$  и

тем надежнее уравнение регрессии может быть применено для практических расчетов.

Оценка коэффициента детерминации может принимать значения в интервале от нуля до единицы ( $0 \leq \hat{R}^2 \leq 1$ ) и определяется выражением

$$\hat{R}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}(x_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где  $n$  – объем выборки;  $\bar{y}(x_i)$  – значение СВУ, предсказываемое уравнением регрессии;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  – безусловное среднее СВУ;  $y_i$  –  $i$ -е выборочное значение СВУ.

Отметим, что коэффициент детерминации не является мерой какой-либо зависимости априорно (как это справедливо для коэффициента корреляции, который всегда характеризует степень линейной зависимости между двумя СВ), он лишь оценивает степень приближения выбранного уравнения регрессионной зависимости к действительной зависимости между двумя СВ. Близость коэффициента детерминации к нулю указывает на то, что выбранное уравнение регрессии (модель зависимости) незначимо объясняет существующую зависимость между СВ. Равенство же коэффициента детерминации единице указывает на то, что выбранное уравнение регрессии полностью (однозначно) определяет зависимость между СВ. Если значение коэффициента детерминации больше 0,7, то считают, что выбранное уравнение регрессии хорошо описывает зависимость, существующую между СВ. В случае когда коэффициент детерминации меньше 0,3, уравнение регрессии незначительно описывает зависимость между СВ, если таковая существует.

**Проверка значимости оценок коэффициентов корреляции и детерминации.** Оценки коэффициентов корреляции и детерминации сами являются СВ, так как для различных выборок из одной и той же генеральной совокупности могут принимать различные значения. При малых объемах выборок эти различия будут особенно существенными. При нахождении оценок коэффициентов корреляции и детерминации используется проверка значимости этих оценок, которая позволяет сделать вывод о существенности описания действительной зависимости выбранным уравнением регрессии.

Проверка значимости  $\hat{r}$ . Чтобы сделать статистический вывод о значимости оценки коэффициента корреляции (при проверке линейной регрессионной зависимости) выдвигается нулевая гипотеза об отсутствии линейной зависимости между исследуемыми СВ (т. е.  $H_0: r = 0$ ;  $H_A: r \neq 0$ ).

Если гипотеза  $H_0$  отклоняется, то считается, что уравнение регрессии  $Y$  на  $X$ , действительно, имеет линейный вид.

Для проверки гипотезы  $H_0$  вычисляется  $t$ -статистика:

$$\hat{t} = \hat{r} \sqrt{\frac{n-2}{1-\hat{r}^2}}.$$

При условии справедливости гипотезы  $H_0$  рассчитанная  $t$ -статистика имеет распределение Стьюдента с  $n-2$  степенями свободы. Значение  $\hat{t}$  сравнивается с критическим значением  $t_{\alpha, \nu}$  при  $\nu = n-2$  степенях свободы. Если расчетное значение  $\hat{t}$  по абсолютной величине превосходит табличное для заданного уровня значимости  $\alpha$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  о линейной независимости двух СВ отклоняется, и с вероятностью ошибки  $\alpha$  можно утверждать, что существует линейная зависимость.

Проверка значимости  $\hat{R}^2$ . При выполнении процедуры проверки значимости оценки коэффициента детерминации выдвигается нулевая гипотеза о том, что предложенное уравнение регрессии никак не отражает реальную зависимость между СВ, т. е. при  $H_0 \hat{R}^2 = 0$ . Альтернативная гипотеза заключается в том, что выбранная модель зависимости (уравнение регрессии)  $\bar{y}(x_i)$  в достаточной степени объясняет действительную зависимость между случайными величинами, т. е. при  $H_a \hat{R}^2 > 0$ .

Для проверки значимости оценки коэффициента детерминации используется статистика

$$\hat{F} = \hat{R}^2 \frac{n-m}{(m-1)(1-\hat{R}^2)},$$

имеющая  $\hat{F}$ -распределение Фишера с  $\nu_1 = m-1$  и  $\nu_2 = n-m$  степенями свободы. Здесь  $m$  – число неизвестных параметров предполагаемого уравнения регрессии  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{m-1})$ . Полученное значение статистики сравнивается с критическим значением  $F_{\nu_1, \nu_2, \alpha}$ , найденным по таблицам квантилей распределения Фишера при заданном уровне значимости и соответствующем числе степеней свободы. Если  $\hat{F} > F_{\nu_1, \nu_2, \alpha}$ , то нулевая гипотеза отклоняется, вычисленный коэффициент детерминации значимо отличается от нуля, и с вероятностью ошибки  $\alpha$  можно утверждать, что между исследуемыми величинами существует зависимость предложенного вида, и полученное уравнение регрессии может использоваться в дальнейшем [84].

### 3.2.4 Дисперсионный анализ

Дисперсионный анализ разработан Р. Фишером в 1920 году и представляет собой группу методов математической статистики для анализа результатов наблюдений, зависящих от нескольких одновременно действующих факторов как случайных, так и детерминированных, как наблюдаемых, так и не наблюдаемых.

На современном этапе развития теории вероятностей основными причинами случайности (непредсказуемости) явлений считаются невозможность учета всех факторов, влияющих на рассматриваемое явление, и ограниченная точность физических измерений.

При прогнозировании случайных явлений исследователи стараются учитывать как можно большее количество влияющих факторов. Например, при определении температуры окружающей среды на следующий день учитывается температура за прошедшую неделю, влажность, давление, расположение атмосферных фронтов, скорость и направление ветра, температура в прилегающих областях, фаза луны, солнечная активность и другие факторы. Однако учесть все факторы (например, солнечную активность) бывает сложно или невозможно. Поэтому ограничиваются лишь значимо влияющими факторами. Вопрос о значимости влияния (в частности, СВ) тех или иных факторов может быть решен методами *дисперсионного анализа*.

Основной целью дисперсионного анализа является проверка свойств распределения некоторой СВ, основанное на выборочных данных. Происхождение названия «дисперсионный анализ» связано с тем, что при исследовании статистической значимости различия между средними значениями двух (или нескольких) групп на самом деле сравниваются (анализируются) их выборочные дисперсии.

Сущностью дисперсионного анализа является расчленение общей дисперсии на части, одна из которых обусловлена случайной ошибкой (т. е. внутригрупповой изменчивостью), а вторая связана с различием средних значений. Последняя компонента дисперсии затем используется для анализа статистической значимости различия между средними значениями. Если это различие значимо, нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза о существовании различия.

Переменные, значения которых определяются с помощью измерений в ходе эксперимента (например, количество отключивших транзисторов), называются *зависимыми* переменными. Переменные, которыми можно управлять при проведении эксперимента (например, значение напряжения, тока, частоты, температуры) называются *факторами*, или *независимыми* переменными.

Дисперсионный анализ удобно выполнять в программах статистической обработки данных, например, Statistica или Statgraphics [98].

При разработке математического аппарата Фишеру потребовалось сделать следующие предположения дисперсионного анализа, необходимые для обоснованности выкладок и выводов:

1) исследуемые факторы *независимы*. С точки зрения способов отбора информации это означает независимость выборочных результатов наблюдения (отдельных выборок или слоев – они не преобразуются друг в друга с помощью какого-либо алгоритма);

2) исследуемые факторы, каждый по отдельности, подчиняются *нормальным* законам распределения;

3) дисперсии исследуемых факторов *однородны* (приблизительно одного порядка).

В зависимости от количества учитываемых факторов дисперсионный анализ может быть одно- или многофакторным. Предметом *однофакторного дисперсионного анализа* является проверка того, зависит ли математическое ожидание СВ  $\xi$  от некоторого фактора. Например, влияет ли форма импульсов электромагнитных помех на помехоустойчивость компьютера системы управления.

*Многофакторный дисперсионный анализ* позволяет проверить, оказывают ли влияние на математическое ожидание СВ  $\xi$  определенные факторы (которые можно варьировать в ходе эксперимента), а также выбрать наиболее важные факторы и оценить степень их влияния. Например, какие из факторов (частота импульсов помех, их длительность, амплитуда, форма, каналы проникновения и пр.) ухудшают качество работы электронного оборудования в большей степени, и, следовательно, какие меры должны быть предприняты для увеличения помехозащищенности и помехоустойчивости оборудования в первую очередь.

**Однофакторный дисперсионный анализ.** Идея однофакторного дисперсионного анализа заключается в разложении общей дисперсии (разброса) СВ  $\xi$  на два независимых слагаемых: факторную дисперсию (разброс, порождаемый воздействием исследуемого фактора  $A$ ) и остаточную дисперсию, обусловленную другими неучтенными воздействиями, т. е.  $D[\xi] = D_{\text{факт}} + D_{\text{ост}}$ . Чем сильнее фактор  $A$  влияет на значение величины  $\xi$  в массе всех влияющих факторов, тем больше факторная дисперсия  $D_{\text{факт}}$  по отношению к остаточной дисперсии  $D_{\text{ост}}$ . В результате сравнения факторной и остаточной дисперсий по критерию Фишера  $F = D_{\text{факт}} / D_{\text{ост}}$  приходят к выводу о значимости влияния фактора  $A$ .

С целью изучения влияния фактора  $A$  на СВ  $\xi$  результаты эксперимента разбиваются в зависимости от вариации фактора  $A$  на  $k$  групп по  $n_i$  измерений в каждой. Результаты измерений обозначаются через  $x_{ij}$ , где  $i$  –

номер уровня фактора  $A$  ( $i = \overline{1, k}$ ),  $j$  – номер результата измерения на данном уровне ( $j = \overline{1, n_i}$ ).

На основе имеющейся статистической информации требуется проверить нулевую гипотезу  $H_0: M[\xi|A_1] = M[\xi|A_2] = \dots = M[\xi|A_k]$  о равенстве условных математических ожиданий СВ  $\xi$  при различных значениях уровня фактора  $A$  против альтернативной гипотезы  $H_a$  о том, что не все условные математические ожидания совпадают (а следовательно, их различия вызваны различием уровней влияющего фактора  $A$ ).

Проверка нулевой гипотезы основывается на вычислении статистического критерия значимости

$$F = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k ((x_i - \bar{x})^2 n_i)}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - x_i)^2},$$

который при условии справедливости гипотезы  $H_0$  имеет распределение Фишера с  $\nu_1 = k - 1$  и  $\nu_2 = n - k$  степенями свободы.

Если значение критерия значимости  $F$  окажется больше критического  $F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$ , определяемого квантилем распределения Фишера с  $\nu_1$  и  $\nu_2$  степенями свободы уровня  $\alpha$  [14], то с вероятностью ошибки, меньшей  $\alpha$ , можно утверждать, что гипотеза  $H_0: M[\xi|A_1] = M[\xi|A_2] = \dots = M[\xi|A_k]$ , неверна (не все условные математические ожидания равны между собой). Следовательно, с вероятностью ошибки, меньшей  $\alpha$ , можно утверждать, что значения исследуемого фактора  $A$  влияют на значения СВ  $\xi$ .

**Замечание.** Дисперсионный анализ основан на нескольких допущениях:

- 1) результаты измерений  $x_{ij}$  внутри  $i$ -й группы имеют нормальный закон распределения;
- 2) внутригрупповые дисперсии результатов измерений  $x_{ij}$  при различных уровнях фактора  $A$  одинаковы, т. е.  $D_1 = D_2 = \dots = D_k$ .

*Примечание* – Приведенные условия выполняются в случае, когда количество неучтенных факторов велико, а их совместное действие на величину  $\xi$  компенсируется (в соответствии с центральной предельной теоремой) и не зависит от значений уровней фактора  $A$ . Выполнение второго условия можно проверить с помощью статистического критерия значимости Бартлетта.

**Пример.** Рассмотрим результаты расчета скорости транспортного средства по длине следа торможения с помощью компьютерных программ экспресс-анализа ДТП и PC-Crash, представленные в таблице 3.4.

На основании результатов однофакторного дисперсионного анализа (таблица 3.5) процедура проверки статистической значимости отличий между результатами программ не выявила существенных отличий. Поэтому обоснованным

видится расчет скорости движения транспортного средства по длине следа торможения по формуле

$$v_a = 1,8 t_3 j + \sqrt{25,92 j s_T},$$

где  $t_3$  – время нарастания замедления, с;

$j$  – замедление, м/с<sup>2</sup>;

$s_T$  – длина следов торможения, м.

Подобным образом может быть проверена значимость влияния погодных условий, состояния дорожного покрытия и квалификации водителя на тяжесть ДТП, экономический ущерб и пр.

**Таблица 3.4 – Расчет скорости ТС по длине следа торможения**

| Длина следа торможения, м | Программа экспресс-анализа ДТП | PC-Crash |
|---------------------------|--------------------------------|----------|
| 10                        | 43,87                          | 40,41    |
| 11                        | 45,85                          | 42,33    |
| 12                        | 47,74                          | 44,26    |
| 13                        | 49,55                          | 46,08    |
| 14                        | 51,29                          | 47,77    |
| 15                        | 52,97                          | 49,47    |
| 16                        | 54,60                          | 51,07    |
| 17                        | 56,17                          | 52,65    |
| 18                        | 57,70                          | 54,22    |
| 19                        | 59,19                          | 55,71    |
| 20                        | 60,64                          | 57,19    |
| 23                        | 64,78                          | 61,27    |
| 25                        | 67,39                          | 63,88    |
| 28                        | 71,12                          | 67,22    |
| 30                        | 73,50                          | 70,00    |
| 33                        | 76,92                          | 73,41    |
| 35                        | 79,12                          | 75,56    |
| 38                        | 82,30                          | 78,74    |
| 40                        | 84,35                          | 80,78    |

**Таблица 3.5 – Результаты статистического анализа в программе Excel**

| Источник вариации | SS     | MS    | $p$      | $F_{крит}$ |
|-------------------|--------|-------|----------|------------|
| Между группами    | 118,2  | 118,2 | 0,725812 | 0,4        |
| Внутри групп      | 5864,5 | 162,9 | –        |            |
| <i>Итого</i>      | 5982,8 | –     |          |            |

**Многофакторный дисперсионный анализ.** Многофакторный дисперсионный комплекс – это совокупность исходных наблюдений, позволяющих статистически оценить действие и взаимодействие нескольких изучаемых факторов на изменчивость результативного признака. Эффект взаимодействия составляет ту часть общего

варьирования, которая вызвана различным действием одного фактора при разных градациях другого. Специфическое действие сочетаний в эксперименте выявляется тогда, когда при одной градации первого фактора второй действует слабо или угнетающе, а при другой градации он проявляется сильно и стимулирует развитие резульативного признака. Например, исследуя вероятность ДТП на определенном участке дороги, необходимо учитывать состояние дорожного покрытия, время года, время суток (день или ночь), наличие гололедицы, видимость в направлении движения, состояние водителя, техническое состояние всех систем транспортного средства, водительские навыки (стаж), действия других водителей и многие другие влияющие факторы.

Рассмотрим подготовку к проведению дисперсионного анализа с точки зрения обеспечения необходимых требований его математического аппарата.

*Независимость* исследуемых факторов является важнейшим условием дисперсионного анализа, пренебрегать которым нельзя из-за опасности получить бессмысленные или неверные выводы. В случае априорной неопределенности в этом плане необходимо провести *корреляционный анализ* на базе отдельного специально поставленного эксперимента. Тогда можно будет опираться хотя бы на некоррелированность факторов (для коррелированных факторов проводить дисперсионный анализ бессмысленно).

Если исследуемые факторы оказались зависимыми или коррелированными, то необходимо попытаться подобрать другие факторы или выбрать только независимые. Большую помощь в этом могут оказать *метод главных компонент* и *факторный анализ*.

*Однородность дисперсий* в слоях при различных значениях исследуемых факторов можно проверить по критерию Фишера.

Таким образом, рекомендуется следующий порядок действий при дисперсионном анализе по выборочным результатам.

1 Проверка независимости (или некоррелированности) исследуемых факторов методами корреляционного анализа. При необходимости обеспечение некоррелированности с помощью замены факторов.

2 Проверка нормального распределения исследуемых факторов по критерию согласия Пирсона. При необходимости замена факторов.

3 Проверка однородности дисперсий по критерию Фишера. При необходимости – замена факторов.

4 Разбиение общей дисперсии на составляющие.

5 Вычисление необходимых межгрупповых и остаточных дисперсий и проверка гипотез о значимости их различия с помощью критерия Фишера.

### 3.2.5 Статистическая проверка адекватности математических моделей

Для проверки адекватности математической модели реальному поведению оригинала рассогласование соответствующих параметров должно удовлетворять двум критериям: *точности* и *непротиворечивости*. Необходим алгоритм проверки этих двух критериев для величины рассогласования результатов контрольного вычислительного эксперимента с результатами натурного эксперимента в тех же условиях:  $\Delta u = u_{\text{модели}} - u_{\text{оригинала}}$ . Эта величина на практике принимает дискретные значения, так как данные об оригинале регистрируются аппаратурой в конечном числе точек замера. Задачей контрольного вычислительного эксперимента в этом случае является получение данных о тех же параметрах в тех же узловых точках. В результате для статистического анализа предлагается множество значений рассогласования  $\{\Delta u_i; i = 1, 2, \dots, N\}$  – выборка из генеральной совокупности истинной величины рассогласования.

Как известно, даже на бытовом уровне, для повышения *точности* измерений проводят не одно измерение, а несколько. Это делается не из-за того, что какое-то из них может оказаться ошибочным, а из-за замечательного свойства дисперсии средней арифметической величины измерений: уменьшаться с ростом числа повторений опытов:

$$D_N = \frac{D}{N} \text{ или } \sigma_N = \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

где  $D$  и  $\sigma$  – дисперсия и среднее квадратическое отклонение в одном опыте (измерении);  $D_N$  и  $\sigma_N$  – дисперсия и среднее квадратическое отклонение результата осреднения замеров по  $N$  опытам. Поэтому с помощью большего числа опытов достигают меньшего рассеивания (среднего квадратического отклонения) данных, т. е. большей точности.

Однако одной величины среднего квадратического отклонения для оценки точности результатов недостаточно. Такая оценка страдает неполнотой, так как не учитывает, насколько часто встречаются большие и малые, положительные и отрицательные рассогласования.

Итак, точность следует определять единой оценкой всего множества наблюдаемых значений СВ рассогласования результатов вычислительного эксперимента и «истинного» значения наблюдаемой величины. По своему смыслу в качестве такой «истинной» единой оценки должно выступать *математическое ожидание* рассогласования, которое обозначим  $a$ . Но об этом «истинном» значении рассогласования мы ничего не можем знать достоверно, остается о нем судить лишь с определенной вероятностью по ограниченному числу опытов. Поэтому наиболее полную оценку точности

(вернее, погрешности) вычислительного эксперимента дает *доверительный интервал* для математического ожидания рассогласования. Например, вывод о точности в этом случае может выглядеть так: с доверительной вероятностью 0,98 гарантируется погрешность коэффициента сцепления не более  $0,3^\circ$ . Критерием оценки точности тогда является соблюдение условий, приемлемых с точки зрения целей исследования.

Единственным практическим *недостатком* такой оценки может быть лишь необходимость знать закон распределения исследуемого рассогласования. Однако, во-первых, для оценки погрешности по подавляющему большинству параметров технических систем можно считать такое распределение нормальным, хотя бы приблизительно в некоторой области, а во-вторых, можно практиковать построение несимметричных доверительных интервалов, отражающих разную степень строгости требований по точности. Доверительный интервал для оценки истинного значения рассогласования  $a$  по найденному значению выборочной средней величины рассогласования  $\Delta u$  при неизвестном значении  $\sigma$ , но известной несмещенной выборочной оценке среднего квадратического отклонения  $s$ :

$$\overline{\Delta u} - t_{\gamma, N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} < a < \overline{\Delta u} + t_{\gamma, N-1} \frac{s}{\sqrt{N}},$$

где  $\overline{\Delta u} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^r N_j \Delta u_j$ ;  $s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^r N_j (\Delta u_j - \overline{\Delta u})^2$ ;  $t_{\gamma, N-1}$  определяется по распределению Стьюдента;  $N_j$  – число попаданий в  $j$ -й интервал (из  $r$ ) наблюдаемых рассогласований  $\Delta u_j$ ;  $\Delta u_j$  – середина  $j$ -го интервала;  $N$  – общее число наблюдаемых значений  $\Delta u$ .

Размер доверительного интервала тем меньше, чем меньше доверительная вероятность  $\gamma$  и чем больше число опытов  $N$ . Естественно, при планировании вычислительного эксперимента следует стремиться к тому, чтобы такая оценка погрешности (т.е. доверительный интервал) не выходила за границы требуемой с точки зрения целей исследования погрешности  $\pm \delta$ , чего можно добиться разумным увеличением числа опытов  $N$  и уменьшением доверительной вероятности  $\gamma$ . Иными словами, следует стремиться к тому, чтобы доверительный интервал целиком укладывался внутри допустимой погрешности (например, от  $-\delta$  до  $+\delta$ ).

Если такого условия не удастся выполнить, то следует или увеличить число опытов  $N$ , или уменьшить доверительную вероятность  $\gamma$ . Однако последнее значительно слабее влияет на результат, тем более, что значения доверительной вероятности  $\gamma < 0,7$  применять не желательно, так как это означает, что почти треть значений рассогласований может выходить за границы доверительного интервала (треть рассогласований принимает

неконтролируемые значения).

Однако оценки точности с помощью доверительного интервала для математического ожидания рассогласования тоже недостаточно. Даже в том случае, когда рассеивание результатов мало и гарантируется с определенной доверительной вероятностью, может существовать *систематическая погрешность*. Ее присутствие свидетельствует о закономерности рассогласования между оригиналом и моделью и не позволяет пользоваться ею.

Оценка систематической ошибки дается по величине выборочного среднего рассогласований, так как эта точечная оценка по своему смыслу характеризует среднее значение рассогласований, «*присутствующее постоянно*». Указанную оценку можно получить с помощью критерия Стьюдента, построенного на  $t$ -распределении, в предположении идеального случая: истинное значение математического ожидания погрешности равно нулю ( $a = 0$ ). По указанному критерию сравниваются две величины:

$$t = \frac{\Delta u}{s} \sqrt{N} \text{ и } t_{\text{крит}}(1-\alpha, N-1),$$

где  $t_{\text{крит}}(1-\alpha, N-1)$  – предельное значение критерия, определяемое по таблице распределения Стьюдента при уровне значимости  $\alpha$  (вероятности совершить ошибку первого рода: отвергнуть верную гипотезу об  $a = 0$ ) с  $N-1$  степенями свободы.

Если  $|t| < t_{\text{крит}}$ , то систематическая ошибка *незначима*, т. е. не существенна и можно считать  $a = 0$ . В случае противоположного неравенства  $|t| > t_{\text{крит}}$  систематическая ошибка *значима*, т. е. не может считаться нулевой. В последнем случае математическая модель может считаться достаточно точной только при выполнении двух условий: доверительный интервал не выходит за границы требуемой с точки зрения целей исследования погрешности  $\pm\delta$ , а выборочное среднее погрешностей  $\Delta u$  пренебрежимо мало с точки зрения целей исследования, чтобы учитывать такую систематическую ошибку.

**Непротиворечивость** со статистической точки зрения может означать незначимость рассогласования, иными словами, неподверженность каким-либо закономерностям. Последний термин и служит основой для построения критерия оценки непротиворечивости с помощью критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ . Для этого достаточно, чтобы рассогласование между моделью и оригиналом имело характер простой ошибки измерений, т. е. подчинялось нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием  $a = 0$ .

По критерию Пирсона  $\chi^2$  для этого сравниваются  $\hat{\chi}^2$  и  $\chi_{\alpha, \nu}^2$ . Если

$\hat{\chi}^2 < \chi_{\alpha, \nu}^2$ , то различие статистического и гипотетического (нормального) законов распределения незначимо. То есть при заданном уровне значимости  $\alpha$  гипотезу о поведении рассогласования эксперимента и «истины» как случайной ошибки измерений можно принять и можно считать результаты вычислительного эксперимента не противоречащими реальному поведению оригинала. В случае противоположного неравенства:  $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha, \nu}^2$  расхождение значимо (закономерно, не может считаться случайным) и гипотезу следует отвергнуть, т. е. результаты вычислительного эксперимента противоречат реальному поведению оригинала.

Только в том случае, когда выполнены условия и требуемой точности, и непротиворечивости, можно считать результаты вычислительного эксперимента адекватными реальному поведению оригинала с доверительной вероятностью  $\gamma$  и уровнем значимости  $\alpha$  в эксперименте из  $N$  опытов.

Составим алгоритм проверки адекватности математической модели реальному поведению оригинала с помощью статистических критериев, предварительно задав допустимую погрешность  $\pm\delta$ , уровень значимости  $\alpha$  и доверительную вероятность  $\gamma$ , исходя из целей исследования. В этом алгоритме строго соблюдается последовательность проверки статистических критериев, каждый следующий из которых опирается на вывод предыдущего.

1 Выбирается один из параметров объекта, для которого есть результаты наблюдения  $\{u_{\text{оригинала } i}\}$  в  $N$  точках, и соответствующий параметр  $\{u_{\text{модели } i}\}$ , полученный в контрольном вычислительном эксперименте в тех же условиях в тех же точках.

2 Вычисляются разности  $\Delta u_i = u_{\text{модели } i} - u_{\text{оригинала } i}$ .

3 Вся область значений  $\Delta u$  разбивается на  $r$  интервалов таким образом, чтобы в каждый из них попало не менее пяти значений  $\Delta u_i$ .

4 Производится расчет количества попадания  $\Delta u_i$  в каждый  $j$ -й ( $1 \leq j \leq r$ ) интервал частот  $N_j$ .

5 Определяются статистические оценки параметров распределения случайной величины  $\Delta u$ :

– выборочное среднее  $\bar{\Delta u} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^r N_j \Delta u_j$ , где  $\Delta u_j$  – середина  $j$ -го интервала;

– несмещенная оценка дисперсии  $s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^r N_j (\Delta u_j - \bar{\Delta u})^2$ .

6 Для проверки непротиворечивости, т. е. подчиненности рассогласования нормальному закону распределения, применяется критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  [98]. Вычисленное значение  $\hat{\chi}^2$  сравнивается с табличным значением распределения Пирсона  $\chi_{\alpha, \nu}^2$ , где наиболее употребительными являются значения  $\alpha = 0,05$  или  $\alpha = 0,01$ . Если  $\hat{\chi}^2 < \chi_{\alpha, \nu}^2$ , то распределение  $\Delta u$  незначимо отличается от нормального, т. е. результаты вычислительного эксперимента можно считать не противоречащими реальному поведению оригинала. Если  $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha, \nu}^2$ , то значимое отличие распределения  $\Delta u$  от нормального свидетельствует о противоречии результатов вычислительного эксперимента реальному поведению оригинала и исследования адекватности прекращают.

Критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  не требует сведений о законах распределения, а все последующие пункты *требуют знания закона* распределения и основаны на том, что  $\Delta u$  распределено по нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием  $a = 0$  и средним квадратическим отклонением.

7 Для оценки систематической ошибки проверяется гипотеза о равенстве нулю математического ожидания ( $a = 0$ ) рассогласования  $\Delta u$  с помощью критерия Стьюдента, для чего вычисляется статистика  $t = \frac{\overline{\Delta u}}{s} \sqrt{N}$ , которая сравнивается с  $t_{\text{крит}}(1-\alpha, N-1)$ , определяемым по таблице распределения Стьюдента при уровне значимости  $1 - \alpha$  и числе степеней свободы  $N - 1$ .

Если  $|t| > t_{\text{крит}}$ , то дальнейшие исследования адекватности нужно прекратить, так как это означает существование недопустимой систематической погрешности между результатами вычислительного эксперимента и реальным поведением оригинала.

Если  $|t| < t_{\text{крит}}$ , то систематическая погрешность отсутствует и можно продолжать исследования.

8 Для оценки точности математической модели строится доверительный интервал для математического ожидания рассогласования при заданной доверительной вероятности  $\gamma$  (обычно 0,8; 0,9; 0,99; или 0,999):

$$\overline{\Delta u} - t_{\gamma, N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} < a < \overline{\Delta u} + t_{\gamma, N-1} \frac{s}{\sqrt{N}},$$

где  $t_{\gamma, N-1}$  определяется по таблице распределения Стьюдента. Если радиус доверительного интервала не превосходит допустимой погрешности

$$t_{\gamma, N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \delta,$$

то математическую модель можно считать достаточно точной по отношению к оригиналу.

В дополнение к этому можно построить доверительный интервал для среднего квадратического отклонения рассогласования

$$s \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{1-\frac{\gamma}{2}, N-2}^2}} < \sigma < \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{\gamma}{2}, N-2}^2}}.$$

9 Если по пункту 7 можно считать математическую модель не противоречащей оригиналу, а по пункту 8 достаточно точной, то результаты расчетов адекватны реальному поведению оригинала.

**Пример.** Рассмотрим проверку адекватности компьютерной программы PC-Crash на примере результатов расчета тормозного пути. Данные натурных испытаний проводились специализированной компанией, причем эксперимент проводился для холодных и перегретых шин. В программе существует возможность учета характеристик резины, параметров трансмиссии и тормозных систем для различных автомобилей, но не учитывается температура шин, поэтому в дальнейшем сравнение результатов моделирования проводится по двум выборкам: для холодных и перегретых шин. Частично результаты представлены на рисунке 3.4.

Используя данные испытаний тормозных путей автомобилей (см. рисунок 3.4), определим рассогласование результатов вычислительного и натурального экспериментов в тех же условиях:  $\Delta u = u_{\text{модели}} - U_{\text{оригинала}}$ .

а)

|                   |                                   |
|-------------------|-----------------------------------|
| Автомобиль        | 100 км/ч;<br>холодные<br>перегрев |
| Audi Q7           | 37,1/39,4                         |
| BMW 550i          | 36,7/37,1                         |
| Dacia Logan       | 41,4/42,1                         |
| Mercedes Sprinter | 42,6/43,6                         |
| Opel Astra        | 39,1/40,4                         |
| Peugeot 207       | 38,3/40,5                         |
| VW Caddy          | 41,1/44,5                         |

б)

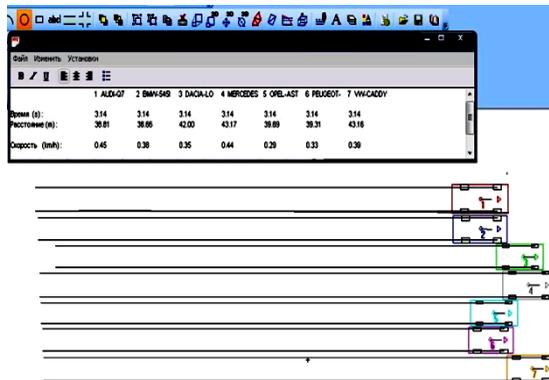


Рисунок 3.4 – Пример результатов испытаний (а) и компьютерного моделирования (б) тормозного пути

Определим статистические оценки параметров распределения случайной величины  $\Delta u$ : выборочное среднее для холодных шин  $a_{х.ш} = 1,214$  м, для перегретых –  $a_{п.ш} = -0,364$  м и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{х.ш} = 0,676$  м,  $\sigma_{п.ш} = 0,84$  м.

Для проверки *непротиворечивости* выполним проверку распределения рассогласований нормальному закону распределения.

В нашем исследовании:  $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha=0,05, v=4}^2 = 9,488$  (для автоматизации расчетов использовалась программа Statistica [99]) для холодных и перегретых шин, значит, данный расчет отвергает проверяемую гипотезу о нормальном законе распределения рассогласования результатов вычислительного и натурального экспериментов при  $\alpha = 0,05$ . На этом этапе можно прекратить статистическую проверку адекватности либо продолжить накапливать результаты, либо изменить  $\alpha$ .

Для оценки систематической ошибки проверяется гипотеза о равенстве нулю математического ожидания ( $a = 0$ ) рассогласования  $\Delta u$ . В предположении, что исследуемая величина имеет нормальный закон распределения (в нашем случае эта гипотеза не подтверждается при  $\alpha = 0,05$ ), проверим гипотезу о равенстве математического ожидания числу  $a = 0$  при альтернативной гипотезе  $H_a$ :  $H_0: M[x] = 0$ ;  $H_a: M[x] \neq 0$ .

Так как точное значение среднеквадратического отклонения неизвестно и альтернативная гипотеза  $H_a: a \neq a_0$ , воспользуемся  $t$ -критерием.

В таблице квантилей распределения Стьюдента по уровню значимости  $\alpha = 0,05$  и числу степеней свободы  $v = n - 1 = 13$  находим  $t_{\alpha/2, n-1} = t_{0,025; 13} = 2,16$ .

Так как  $|t| > t_{0,025; 13}$ , то по имеющимся данным есть основания для отклонения гипотезы о равенстве математических ожиданий для холодных и перегретых шин различных моделей автомобилей.

## **4 ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВАРИАНТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Оптимальными называются решения, которые по тем или другим признакам предпочтительнее перед другими [101].

Оптимизация – процесс нахождения наилучшего или оптимального решения какой-либо задачи (набора параметров) при заданных критериях. Характеризуя объект, сложно выбрать один такой критерий, который бы обеспечил всю полноту требований. А стремление к всеобъемлющему решению и назначение большого числа критериев сильно усложняет задачу. Поэтому в разных задачах количество критериев может быть различным. Задачи однокритериальной оптимизации называют скалярными, а многокритериальной – векторной оптимизацией.

Критерий оптимальности – характерный показатель решения задачи, по значению которого оценивается оптимальность найденного решения, то есть максимальное удовлетворение поставленным требованиям. В одной задаче может быть установлено несколько критериев оптимальности.

Иногда (относительно редко) в результате исследования удается указать одно-единственное строго оптимальное решение, гораздо чаще – выделить область практически равноценных оптимальных (разумных) решений, в пределах которой может быть сделан окончательный выбор.

Заметим, что само принятие решения выходит за рамки исследования операций и относится к компетенции ответственного лица, чаще – группы лиц, которым предоставлено право окончательного выбора и на которых возложена ответственность за этот выбор. Делая выбор, они могут учитывать, наряду с рекомендациями, вытекающими из математического расчета, еще ряд соображений (количественного и качественного характера), которые этим расчетом не были учтены.

Статистические модели, по сравнению с аналитическими, более точны и подробны, не требуют столь грубых допущений, позволяют учесть большое (в теории – неограниченно большое) число факторов. Но и у них свои недостатки: громоздкость, сложность поиска оптимальных решений, которые приходится искать «на ощупь», путем догадок и проб.

В предельном случае решение практических задач можно свести к задаче двухкритериальной оптимизации, критериями в которой являются «цена» и «качество» (т. н. «цена – качество»). Это наглядно позволяет учесть и экономические и производственно-технические требования. Следует подчеркнуть, что оптимизация в отличие от обычного сравнения

вариантов предполагает рассмотрение всех решений, попадающих в область допустимых значений параметров. Те решения, в процессе поиска которых не проводился полный просмотр возможных вариантов, обычно называют «рациональными». Иногда общим методом для многокритериальных задач называют оптимальность по Парето [100], которое позволяет найти ряд «неулучшаемых» решений, однако этот метод не гарантирует глобальной оптимальности решений. Менее известна «оптимальность по Слейтеру».

#### 4.1 Методы векторной оптимизации сложных систем

В процессе решения большинства задач проектного моделирования сложных систем (СЛС) возникает необходимость их оптимизации по совокупности откликов вероятностных и имитационных моделей, при этом оценивается эффективность вариантов их функционирования по различным критериям [58]. Такая оптимизация получила название *векторной*, или *многокритериальной*. Ее особенностью является наличие не одного, а целого множества решений, каждое из которых может быть выбрано в качестве оптимального. В общем виде задачи векторной оптимизации СЛС могут быть записаны следующим образом:

$$Y_i = f_i(x) \rightarrow \max; \quad i = \overline{1, k}; \quad Y_j = f_j(x) \rightarrow \min; \quad j = \overline{k+1, m}, \quad x \in G.$$

Перечислим основные методы векторной оптимизации сложных систем.

**Выделение главного критерия.** Пусть  $Y_1 = f_1(x) \rightarrow \max$ , тогда

$$Y_i = f_i(x) \geq \hat{Y}_i^*; \quad i = \overline{2, k}; \quad Y_j = f_j(x) \leq \hat{Y}_j^*; \quad j = \overline{k+1, m}, \quad x \in G.$$

Как видим, для остальных критериев качества вариантов СЛС стремятся, чтобы они были либо больше, либо меньше некоторого граничного значения (соответственно  $\hat{Y}_i^*$  и  $\hat{Y}_j^*$ ). Часть контроля качества вариантов СЛС осуществляется по главному критерию, но при условии, что по всем остальным критериям качества отклика СЛС находится в допустимых пределах.

**Метод последовательных уступок.** Все отклики вариантов СЛС можно расположить в порядке уменьшения их важности. Например, пусть важность откликов расположена следующим образом:  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  и пусть для всех  $Y_i$  необходимо добиться их максимизации из возможных вариантов. Алгоритм метода сводится к следующему. Вначале находится решение, обращающее в максимум главный критерий  $\hat{Y}_1^* = f_1^*(x) \rightarrow \max$ . Затем из априорных соображений назначается некоторая «уступка»  $\Delta f_1$ , требующая выполнения неравенства  $f_1(x_i) \geq f_1^*(x) - \Delta f_1$ , где  $f_1^*(x) = \max f_1(x)$ , и находим такое решение  $x_i$ , при котором  $f_2(x) \rightarrow \max$ .

Далее снова назначается «уступка» по критерию  $Y_2(x) = f_2(x)$ .

Например, пусть это будет  $\Delta f_2$ , с помощью которой можно максимизировать  $f_2^*(x) = \max f_2(x)$ . Этот процесс продолжается до тех пор, пока по всем откликам не будет достигнута некоторая близость к максимальным значениям с учетом сделанных уступок:  $\Delta f_i$ ;  $i = \overline{1, n}$ .

**Методы приведения откликов к одному типу и масштабу.** В ряде случаев исследователю удобно, чтобы все отклики были однотипны (требовали либо максимизации, либо минимизации). На практике очень часты случаи, когда какой-либо отклик, например  $Y_2(x)$ , требует минимизации ( $Y_2(x) \rightarrow \min$ ), а все остальные отклики требуют максимизации ( $Y_i(x) \rightarrow \max$ ;  $i \neq 2$ ;  $i = 1, 3, \dots, n$ ). В таких случаях для откликов, требующих минимизации, находят обратную величину:  $Y_2^*(x) = 1/Y_2(x)$ .

Однако этой операции может оказаться недостаточно, поскольку каждый отклик имеет различный смысл и его значение определяется с различной размерностью (килограммы, метры, секунды, миллиметры, метры). Поэтому отклики трудно сравнивать друг с другом даже в случае, когда они одного типа. В таких случаях используется операция «нормировка». Находят для каждого отклика максимальное значение:

$$Y_{mi} = \max_i Y_i \quad \text{или} \quad Y_{mj}^* = \max_j Y_j^*; \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Проводится нормировка каждого отклика:

$$Y_i^{**} = Y_i / Y_{mi} \quad \text{— для откликов, требующих максимизации;}$$

$$Y_j^{**} = Y_j^* / Y_{mj}^* \quad \text{— для откликов, полученных с помощью операции}$$

приведения к одному типу.

В итоге все компоненты вектора параметров  $\{Y_i^{**}\}; i = \overline{1, n}$  будут иметь одинаковый тип (в данном случае требовать максимизации) и изменяться в одном и том же диапазоне их значений  $[0, 1]$  (нормированных максимальным значением). Поэтому их можно сравнивать.

**Метод составного критерия.** Когда все отклики имеют один и тот же масштаб изменения, и они все одного типа, исследователь может формировать составной отклик  $Y_0(x)$  согласно следующей процедуре. Исследователь сам определяет важность каждого критерия с помощью весовых коэффициентов важности ( $\delta_i$ ). Предполагается, что  $\delta_i \geq 0$   $i = \overline{1, n}$ , а

$$\text{сумма коэффициентов важности равна единице: } \delta_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^n \delta_i = 1.$$

Определяется составной (обобщенный) отклик варианта СС:

$$Y_0(x) = \sum_{i=1}^n \delta_i Y_i(x). \quad \text{Если } Y_i(x) \rightarrow \max, \text{ то и } Y_0(x) \rightarrow \max.$$

Несмотря на удобную форму записи, обобщенные критерии качества вариантов СЛС имеют существенные недостатки, связанные с субъективностью выбора весовых коэффициентов важности откликов ( $\delta_i$ ), а также с тем фактом, что недостатки эффективности вариантов СЛС по одним критериям могут компенсироваться за счет преимуществ по другим критериям.

**Нормативные методы** являются обобщением рассмотренных выше методов и состоят в предварительном получении нормативов  $nr_{f_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  на основе приближенного решения многоцелевой задачи и приближения к этим нормативам по некоторой заранее заданной метрике  $\rho(f(x), nrf) \rightarrow \min$ , где весовые коэффициенты определяются различными способностями. Например, в качестве метрики выбирают:

$$\rho_1^2(f(x), nrf) = \sum_{i=1}^n [f_i(x) - nr_{f_i}]^2; \quad \rho_2(f(x), nrf) = \sum_{i=1}^n |f_i(x) - nr_{f_i}|;$$

$$\rho_3(f(x), nr_f) = \max_i |f_i(x) - nr_{f_i}|.$$

Выбор метрики исследователь осуществляет из априорной информации об исследуемой сложной системе.

**Методы логического объединения критериев.** Используются только в тех случаях, когда отклики  $Y_i = f_i(x)$ ,  $i = \overline{1, n}$  могут принимать только два значения – 0 или 1:

$$Y_i(x) = f_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я цель исследования достигнута,} \\ 0, & \text{если } i\text{-я цель исследования не достигнута.} \end{cases}$$

В таких случаях используются два вида обобщенных откликов:

– в виде конъюнкции откликов  $Y_i(x)$ , если общая цель состоит в достижении всех целей одновременно:

$$Y_{01}(x) = \prod_{i=1}^n f_i(x) = \prod_{i=1}^n Y_i(x);$$

– в виде дизъюнкции откликов  $Y_i(x)$ , если общая цель состоит в достижении хотя бы одной из целей:

$$Y_{02}(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - f_i(x)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i(x)).$$

Во всех методах параметр  $X$  выступает в качестве обобщенной характеристики. На практике  $X$  может, в свою очередь, быть многомерной величиной. К ней также могут быть применены способы отображения ее в виде скалярной величины, путем приведения к одному типу и нормировки значений ее компонентов, приводящей к тому, что у  $X$  все компоненты

изменяется на одном и том же интервале значений  $[0, 1]$ , и используют в этом случае составной параметр  $X_0$ . Способы такой модификации параметра  $X$  к обобщенной величине можно найти в работе [102]. Оставив в стороне методику приведения многомерного вектора параметров  $\{X_j\}, \dots, j = \overline{1, m}$  к обобщенному скаляру, вначале рассмотрим методики оптимизации целевой функции моделирования от одной переменной  $X$ .

#### 4.2 Оптимизация нелинейной функции отклика от одной переменной

Рассмотрим задачу максимизации различных видов целевых функций. В случае максимизации линейной целевой функции (ЦФ) одной переменной имеем  $C(x) = C_0 + C_1 x$ , график которой приведен на рисунке 4.1, а. Если на  $x$  не налагается никаких ограничений, то при любом  $C_1 \neq 0$  значение ЦФ можно сделать сколь угодно большим. Если же  $a_1 \leq x \leq a_2$ , то  $x = a_1$  оптимально при  $c_1 \leq 0$ , а при  $c_1 \geq 0$  оптимальным будет  $x = a_2$ . Следовательно, оптимальным является решение, соответствующее экстремальной точке. Однако если функция  $C(x)$  нелинейна, то возможны другие ситуации, изображенные на рисунке 4.1, б. Предположим, что:

1) значения  $x$  лежат в пределах конечного сегмента  $I \equiv [a_1, a_2]$  т. е.  $a_1 \leq x \leq a_2$ , где  $-\infty < a_1 < a_2 < +\infty$ ;

2) функция  $C(x)$  непрерывна и ограничена сверху для всех  $x$  на сегменте.

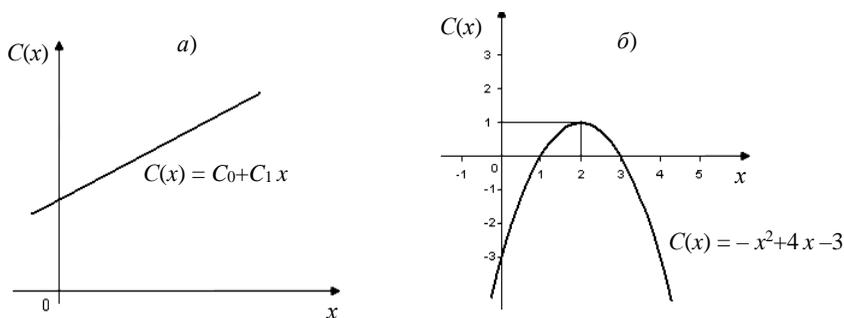


Рисунок 4.1 – Примеры нелинейных функций отклика

Из этих допущений следует, что  $C(x)$  достигает максимума при значении  $x$ , находящемся на сегменте  $I$ . Рассмотрим случай, когда функция  $C(x)$  является монотонной на сегменте  $I$ , и всегда достигается максимум  $x$  на  $I$  в одной из экстремальных точек сегмента. Если  $C(x)$  является выпуклой функцией  $x$  на  $I$ , то для любых  $x_1$  и  $x_2$  на  $I$  функция  $C(x)$  удовлетворяет условию

$$pC(x_1) + (1 - p) C(x_2) \geq C [px_1 + (1 - p)x_2].$$

Рассмотрим функцию  $C(x)$ , график которой изображен на рисунке 4.2. Максимальное значение  $C(x)$  достигается при  $x = f$ . Предположим, что проверка значения  $C(x)$  начинается со значения  $x = a$ . Если первое проверяемое значение  $x$  меньше  $a$ , тогда каждое проверяемое значение  $x$  всё больше и больше будет приближаться к  $a$ , но не будет превышать  $a$ , поскольку  $C(a)$  есть *локальный максимум*.

Далее предположим, что проверяемое значение аргумента  $x$  находится на сегменте  $[d, e]$ . Тогда, по-видимому, последовательный поиск закончится сразу же, поскольку как при небольшом увеличении, так и при небольшом уменьшении значения  $x$  функция  $C(x)$  не меняет своей величины и ее улучшение не представляется возможным. Как видно из рисунка 4.2, рассмотрение функции  $C(x)$  на сегменте  $[0, g]$  является более общей ситуацией, чем это действительно необходимо для достижения задачи максимизации. График  $C(x)$  можно разделить на 5 различных участков, где функция является *одномеральной*. При этом на каждом  $j$ -м участке ( $j = \overline{1,5}$ ) модами являются соответственно:

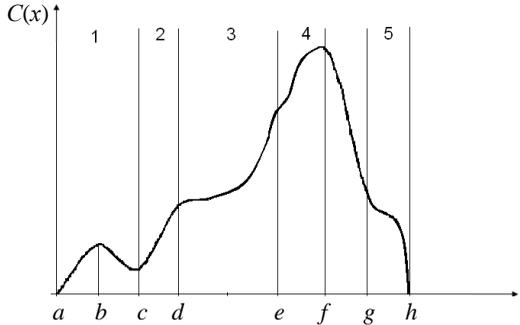
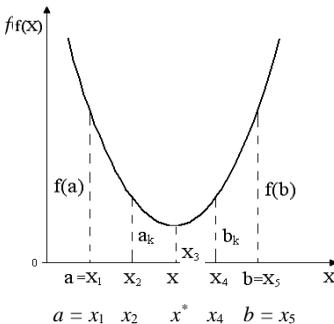


Рисунок 4.2 – Функция отклика, обладающая многими локальными оптимумами

$$\text{Mod}_1 = C(a); \text{mod}_2 = C(c); \text{mod}_3 = C(d); \text{mod}_4 = C(f); \text{mod}_5 = C(d).$$

Экстремумом функции  $C(x)$  будет мода  $\text{mod}_4$ . На практике исследователи стараются поделить область изменения функции на ряд унимодальных участков, а затем из значений мод выбирают ту, которая является максимальной на всём участке определения  $x$ . В нашем примере экстремум  $C(x)$  достигается при  $x = f$  и он равен  $\text{ekst}C = C[f]$ . Для поиска экстремума унимодальной функции от одной переменной используются методы *дихотомии* и *золотого сечения*. Рассмотрим алгоритмы реализации этих методов.



**Метод дихотомии.** Пусть функция  $f(x)$  имеет на отрезке  $[a, b]$  минимум в точке  $x^*$  (рисунок 4.3). Вычисление абсциссы  $x^*$  точки

Рисунок 4.3 – Пример функции отклика с одним минимумом

минимума  $f(x)$  сводится к вычислению отрезка  $[a_n, b_n]$ , длина которого  $|b_n - a_n| < \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  – заданная точность вычисления и  $x \in [a_n, b_n]$ .

Сущность метода дихотомии заключается в следующем:

1) полагаем  $x_1 = a$  и  $x_5 = b$ ; делим отрезок  $[a, b]$  точками  $x_2, x_3$  и  $x_4$  на четыре равные части;

2) вычисляем значения функции  $f(x)$ :  $f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4), f(x_5)$ ;

3) среди чисел  $f(x_i)$  находим минимальные. Пусть, например,  $f(x_i) = \min\{f(x_i), i = \overline{1,5}\}$ . В силу унимодальности  $f(x)$  на отрезке  $[a, b]$  точка  $x^*$  находится на отрезке  $[x_2, x_4]$ , длина которого по построению вдвое меньше длины отрезка  $[a, b]$ .

Если всё-таки  $|x_{k+1} - x_k| > \varepsilon$ , то полагаем  $a = x_{k-1}$ ,  $b = x_{k+1}$  и вновь выполняем все действия, начиная с п.1. Если на  $n$ -й итерации мы получим, что локализованный отрезок  $|x_{k+1} - x_k| \leq \varepsilon$ , то в качестве значения  $x^*$  можно, например, принять  $x^* = (x_{k-1} + x_{k+1})/2$ .

В качестве примера найдем методом дихотомии минимум функции  $f(x) = \sin x + \sqrt{x}$  на отрезке  $[3, 6]$ . Точность  $\varepsilon$  примем равной 1.

График функции  $f(x)$  имеет вид, представленный на рисунке 4.4.

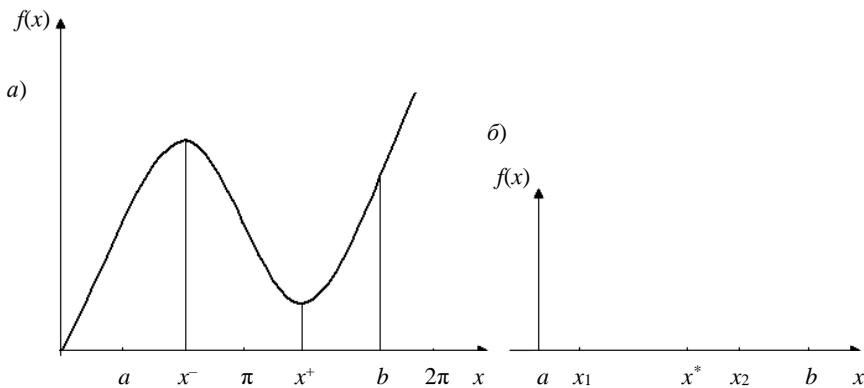


Рисунок 4.4 – Примеры функций:  $a$  – отклика с двумя экстремумами;  $b$  – выбора точек деления отрезка по методу золотого сечения

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом выполняем действия.

Первая итерация:

1)  $x_1 = a = 3; x_5 = b = 6; x_2 = 3,75; x_3 = 4,5; x_4 = 5,25;$

2) вычисляем значения  $f(x_i)$ ;  $i = \overline{1,5}$ :

$$f(x_1) = 1,87; f(x_2) = 1,36; f(x_3) = 1,14; f(x_4) = 1,43; f(x_5) = 2,17;$$

3) выбираем  $\min \{f(x_i), i = \overline{1,5}\} = f(x_3) = 1,14$ .

Следовательно,  $x^* \in [x_2, x_4] = [3,75; 5,25]$ . Длина этого отрезка составит  $5,25 - 3,75 = 1,5$ , что больше  $\varepsilon$ , и мы повторяем все действия, полагая теперь, что новый отрезок  $[a, b]$ , на котором находится  $x^*$ , равен  $[3,75; 5,25]$ .

Вторая итерация:

1)  $x_1 = a = 3,75, \quad x_5 = b = 5,25, \quad x_2 = 4,12, \quad x_3 = 4,5, \quad x_4 = 4,88;$

2)  $f(x_1) = 1,36, \quad f(x_5) = 1,43, \quad f(x_2) = 1,20, \quad f(x_3) = 1,14, \quad f(x_4) = 1,22;$

3)  $\min \{f(x_i), i = \overline{1,5}\} = f(x_3) = 1,14$ .

Выбираем отрезок  $[x_2, x_4] = [4,12; 4,88]$ . Длина этого отрезка равна  $0,76$ , т. е.  $|x_4 - x_2| < \varepsilon$ . Следовательно, можно сказать, что  $x^* = (4,88 + 4,12) / 2 = 4,5$

и  $f(x^*) \approx 1,1438$ . Безусловно,  $\varepsilon = 1$  обеспечивает нам очень грубое решение задачи. На практике, как правило, задают  $\varepsilon$  малым, например, равным  $0,000001$ . Но наша цель – продемонстрировать практическое применение метода дихотомии для нахождения минимума целевой функции.

**Метод золотого сечения.** Прежде всего напомним, что если  $d$  – длина отрезка, то золотое сечение отрезка определяется пропорцией  $\frac{d}{x} = \frac{x}{d-x}$ ,

т. е.  $x$  находится из квадратного уравнения  $x^2 + dx - d^2 = 0$ , и следовательно,  $x_1 \approx 0,38d$  и  $x_2 \approx 0,62d$  (см. рисунок 4.4, б).

Пусть по-прежнему целевая функция  $f(x)$  имеет на отрезке  $[a, b]$  единственный минимум в точке  $x^*$ . Абсциссу точки  $x^*$  мы и стремимся найти с заданной точностью  $\varepsilon = 1$ . Метод золотого сечения предписывает выполнение следующих действий:

1) вычисляем  $x_1 = a + 0,38(b - a)$  и  $x_2 = a + 0,62(b - a)$ ;

2) вычисляем  $f(x_1)$  и  $f(x_2)$ . При этом могут иметь место случаи:

а)  $x_2 > x_1$  и  $f(x_1) > f(x_2)$ . В этом случае  $x^* \in [x_1, b]$ ;

б)  $x_2 > x_1$  и  $f(x_1) < f(x_2)$ . В этом случае  $x^* \in [a, x_2]$ ;

в)  $x_2 > x_1$  и  $f(x_1) = f(x_2)$ . В этом случае  $x^* \in [x_1, x_2]$ ;

3) выбираем отрезок, которому принадлежит точка  $x^*$ . Назовем его  $[a_1, b_1]$ . Длина этого отрезка меньше длины исходного отрезка  $[a, b]$ , но если только  $|b_1 - a_1| \leq \varepsilon$ , мы можем считать, что с точностью  $\varepsilon$   $x^* = (b_1 + a_1) / 2$ .

В противном случае мы повторяем действия 1–3 до тех пор, пока на  $n$ -м шаге не будет локализован отрезок  $[a_n, b_n]$ , для которого будет выполнено требование  $|b_n - a_n| \leq \varepsilon$ .

Проиллюстрируем применение метода золотого сечения для нахождения минимума целевой функции из примера.

**Пример.** Найти на отрезке  $[3; 6]$  методом золотого сечения минимум функции  $f(x) = \sin x + \sqrt{x}$ . Точность  $\varepsilon$  принять равной 1.

*Решение.* Первая итерация:

1) вычислим абсциссы точек золотого сечения  $x_1 = 3 + 0,38(6 - 3) = 4,15$  и  $x_2 = 6 - 0,38(6 - 3) = 4,86$ ;

2) вычислим  $f(x_1) = 1,19$ ,  $f(x_2) = 1,21$ . Очевидно, мы имеем случай «б», т. е. при  $x_2 > x_1$   $f(x_1) < f(x_2)$ . Следовательно,  $x^* \in [3; 4,86]$ .

3) длина отрезка, содержащего  $x^*$ , равна 1,86, что больше  $\varepsilon$ , поэтому следует выполнить еще одну итерацию, принимая отрезок  $[a; b_1] = [3; 4,86]$ .

Вторая итерация:

1)  $x_1 = 3 + 0,38 \cdot 1,86 = 3,7$ ;  $x_2 = 4,86 - 0,38 \cdot 1,86 = 4,15$ ;

2)  $f(x_1) = 1,39$ ;  $f(x_2) = 1,19$ . Поскольку  $f(x_1) > f(x_2)$ , то  $x^* \in [3,7; 4,86]$ . Длина этого отрезка равна  $4,86 - 3,7 > \varepsilon$ , поэтому выполним третью итерацию.

Третья итерация:

1)  $x_1 = 3,7 + 0,38 \cdot 1,16 = 4,15$ ;  $x_2 = 4,86 - 0,38 \cdot 1,16 = 4,42$ ;

2)  $f(x) = 1,19$ ,  $f(x_2) = 1,44$ ;  $f(x_1) > f(x_2)$ , следовательно,  $x^* \in [4,15; 4,86]$ . Так как длина последнего отрезка равна  $0,71 < \varepsilon$ , мы можем считать, что с точностью  $\varepsilon$   $x^* = (4,15 + 4,86) / 2 = 4,505$ , а значит,  $f(x^*) = 1,1439$ .

### 4.3 Максимизация функции отклика от многих переменных

**Вычислительный алгоритм максимизации функции отклика.** В тех случаях, когда вычислительный алгоритм максимизации функции отклика  $C(x_i)$  зависит от значений компонентов вектора параметров  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , исследователю приходится постулировать, что функция  $C(x_i)$   $i = \overline{1, m}$  достигает конечного максимума при конечных значениях  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ .

Сокращенно обозначим:  $\{x_i\}$  – через  $X$ ,  $\{\hat{x}_i\}$  – через  $\hat{X}$ ,  $C(x_i)$  – через  $C(X)$ .

Кроме того, исследователь должен предположить следующие допущения:

1) при всех значениях  $\{x_i\}$  функция  $C(X)$  однозначна и конечна;

2) при всех значениях  $X$  каждая частная производная  $\frac{\partial C(X)}{\partial X_j}$  однозначна,

конечна и непрерывна, так что функция  $C(X)$  также непрерывна;

3) функция  $C(X)$  обладает конечным максимумом  $\hat{C}$ ;

4) при возможных значениях  $C(X)$ , например  $C$ , существует такое конечное число  $M_C$ , что  $\{x_j\} \leq M_C$ , если  $C(X) \geq C$ .

Из теории дифференциального исчисления известно, что необходимым условием существования максимума является выполнение первых трех допущений. Это означает, что функция  $C(X)$  имеет максимум в точке  $\hat{X}$  только в том случае, если  $\frac{\partial C(X)}{\partial X_j} = 0$  для всех  $j = 1, 2, \dots, n$ . Многие

вычислительные методы максимизации  $C(X)$  имеют следующую стандартную форму.

*Шаг 1.* Выбирают качестве исходной произвольную пробную точку  $X^0$ .

*Шаг 2.* Расчеты прекращают, если в пробной точке  $X^k$  частные производные равны нулю, иначе определяют значение  $Y_j^k$  для  $j = 1, \dots, n$  и переходят к шагу 3 (где  $k$  – номер пробной точки).

*Шаг 3.* Определяют новую пробную точку и переходят к шагу 1.

Возвращаются к выполнению шага 2, заменив  $X^k$  на  $X^{k+1}$ . При этом определяют направление  $d_j^n$  для  $j = 1, \dots, n$  на основе информации о поведении  $C(X)$  вблизи проверяемой точки  $X^n$ , т. е. на локальных свойствах изменения  $C(X)$ . Выбор длины шага  $t^h$  основан на информации о поведении  $C(X)$  за пределами окрестности точки  $X^n$  при движении в выбранном направлении  $d_1^k, d_2^k, \dots, d_n^k$ . Наконец, направление и длина шага объединяются в величинах:  $Y_j^k = t^k d_j^h$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ .

**Пример.** Нужно максимизировать функцию  $C(X_1, X_2) = -(X_1 - 3)^2 - 4(X_2 - 2)^2$ .

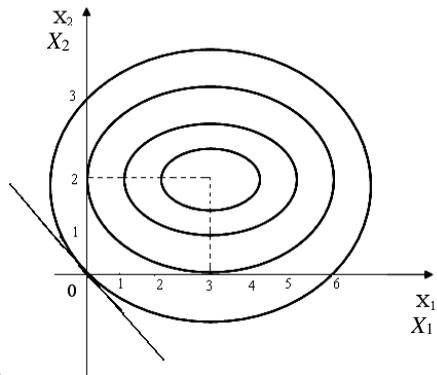
Исследуя  $C(X)$ , можно установить, что единственным оптимальным решением является  $\hat{X}_1 = 3$ ;  $\hat{X}_2 = 2$ , при котором  $C(\hat{X}) = 0$ . Поскольку  $C(X)$  является квадратичной функцией, оптимальное значение  $X$  можно вычислить непосредственно из необходимых

условий  $\frac{\partial C(X)}{\partial X_j} = 0$ ;  $i = \overline{1, 2}$ . На рисунке

4.5 приведен график линий уровня  $C(X_1, X_2)$ . Начало алгоритма осуществляется при  $X_1^0 = X_2^0 = 0$  и при  $C(X^0) = -25$ . Линии уровня имеют вид эллипсов, уравнения для которых

$$\frac{\partial C}{\partial X_1} = -2(X_1 - 3); \quad \frac{\partial C}{\partial X_2} = -8(X_2 - 2).$$

Обе эти производные в точке  $X^0$  строго положительны. Поэтому на шаге 2 направление дальнейшего изменения значений  $X_1$  и  $X_2$  приведено



102

Рисунок 4.5 – Касательная к линиям уровня

на рисунке 4.6. В процессе подготовки к выбору направления  $d_1$  и  $d_2$  проводится касательная к линиям уровня  $C(X)$  в точке  $X^0$ . В итоге имеет место система уравнений

$$\frac{\partial C}{\partial X_1}(X_1 - X_1^0) + \frac{\partial C}{\partial X_2}(X_2 - X_2^0) = 0,$$

При  $X_1^0 = X_2^0 = 0$  система уравнений имеет решение

$$6X_1 + 16X_2 = 0, \text{ или } X_2 = -\frac{3}{8}X_1.$$

Сама же касательная показана рисунке 4.6, *a*. Направление  $d_1d_2$  изображено в виде вектора, выходящего из исходной точки. Из рисунка 4.6, *б* видно, что значение  $C(X)$  на каждой итерации улучшается. При возрастании номера шага  $k$  пробные точки лежат на спирали, всё больше и больше приближаясь к окружности.

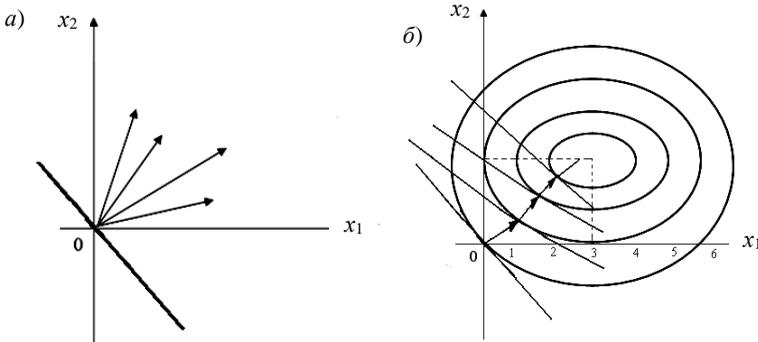


Рисунок 4.6 – Направления движения (*a*) и оптимальная длина шага (*б*)

**Метод скорейшего подъема.** Позволяет учитывать информацию о виде целевой функции при движении от произвольной точки  $\hat{X}$  к значению  $\hat{X}_n$ , обеспечивая его движение за минимальное число итераций. Приняв в качестве  $d_j^k = \frac{\partial C}{\partial X_j}$  в пробной точке  $X^k$  величину приращения, равную  $t^k \geq 0$ ,

можно максимизировать целевую функцию путем добавления приращений на каждом  $k$ -м шаге оптимизации:  $C(X_1^k + t^k d_1^k, \dots, X_n^k + t^k d_n^k)$ .

В методе применена идея использования в качестве направления набора частных производных, обычно именуемого градиентом функции  $C(X)$  в точке  $X^k$ , обозначаемого символом  $\nabla C(X)$ :

Вектор  $[\text{grad}C(X)]$  называется антиградиентом функции  $C(X)$ . Он указывает направление наискорейшего убывания функции  $C(X)$ .

Для простоты рассмотрим функцию двух переменных  $C(X_1, X_2)$ . На рисунке 4.7 изображены две линии уровня:

$$C(X_1, X_2) = S; C(X_1, X_2) = S + \Delta S.$$

Как известно, линии уровня функции  $C(X)$  – это множество точек, в которых данная функция  $C(X_1, X_2)$  принимает одно и то же фиксированное значение. Рассмотрим какую-либо точку  $M_0(X_1^0, X_2^0)$  на линии  $C(X_1, X_2) = S$  и точку  $M_1(X_1^1, X_2^1)$  на линии  $C(X_1, X_2) = S + \Delta S$ .

Приращение функции  $\Delta C$  при переходе из точки  $M_0$  в точку  $M_1$  равно  $\Delta C = \Delta S$ , и это приращение не зависит от положения точки  $M_1$  на линии  $C(X_1, X_2) = S + \Delta S$ .

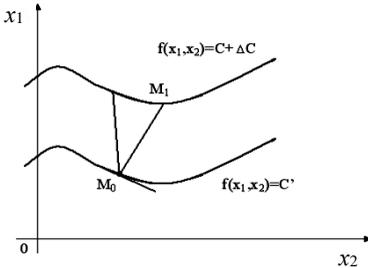


Рисунок 4.7 – Линии уровня функции двух переменных

Отношение приращения функции к длине отрезка  $M_0 M_1$  назовем средней скоростью изменения функции  $C(X_1, X_2)$  на отрезке  $M_0 M_1$ . Очевидно, что средняя скорость ее изменения  $\Delta C / |M_0 M_1|$  зависит от длины отрезка  $M_0 M_1$  или от положения точки  $M_1$  на линии  $C(X_1, X_2) = S + \Delta S$ . При этом скорость  $\Delta C / |M_0 M_1|$  достигает наибольшего значения там, где длина отрезка  $M_0 M_1$  будет наименьшей. Известно, что длина

отрезка наименьшая в том случае, когда направление отрезка  $M_0 M_1$  перпендикулярно касательной  $C(X_1, X_2) = S$  в точке  $M_0$  при  $\Delta C \rightarrow 0$ .

Теперь, если рассматривать предел отношения  $\lim \frac{\Delta C}{|M_0 M_1|}$ , это означает определение производной. Итак, частные производные  $\frac{\partial C(M_0)}{\partial X_1}$  и  $\frac{\partial C(M_0)}{\partial Y_1}$  определяют максимальные скорости изменения  $C(X_1, X_2) = C$  в точке  $M_0$ .

Как видим, идея градиентного метода реализуется следующим порядком шагов при поиске экстремума функции  $C(X)$ .

*Шаг 1.* Выбираем начальную точку  $M_0$ , принадлежащую области определения функции  $C(X)$ .

*Шаг 2.* Находим направление градиента функции  $C(X)$  в точке  $M_0$ :

$$C(M_0) = \left( \frac{\partial C(M_0)}{\partial X_1}, \frac{\partial C(M_0)}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial C(M_0)}{\partial X_n} \right).$$

*Шаг 3.* Задаем приращение из точки  $M_0$ , на величину, равную  $\alpha$ , в точку  $M_i$ . В результате получаем расчетные формулы

$$X_j(M_1) = X_j(M_0) + \alpha \frac{\partial C(M_0)}{\partial X_j}; \quad j = \overline{1, n}.$$

При поиске минимума функции необходимо перемещаться в направлении антиградиента, и в этом случае  $\alpha < 0$ . При поиске максимум функции  $C(X)$ ,  $\alpha > 0$ . Признаком достижения минимума (максимума) функции служит обращение в нуль градиента  $\text{grad } C = 0$ . Но на практике, как правило, ограничиваются приближенным решением. Поэтому критерием достижения требуемого результата является выполнение условия

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial C(X)}{\partial X_j} \right)^2 \leq \varepsilon.$$

Существуют и другие критерии. Например, после каждой итерации можно сравнивать достигнутое значение целевой функции с ее значением в предыдущей точке. Если выполняется неравенство  $|C(M_n) - C(M_{n-1})| \leq \varepsilon$ , то поиск экстремума функции  $C(X)$  прекращается.

В качестве **примера** рассмотрим поиск экстремума целевой функции закупки сырья двух видов дорожными службами (СМЭП). Пусть дорожная служба закупает сырье в количестве соответственно  $X_1$  и  $X_2$  в тоннах. Расходы на хранение сырья на складе определяются по функции  $C(X_1, X_2) = X_1^2 - 7X_1 + X_2^2 - 4X_2 - X_1X_2 + 35$ . Необходимо определить объемы сырья ( $X_1^*$  и  $X_2^*$ ), расходы на хранение которых будут минимальны. Примем точность вычислений, равную  $\varepsilon = 1$ . В качестве начальной  $M_0$  выберем точку с координатами  $X_1 = 1$ ;  $X_2 = 1$ , причем шаг установим равным  $\alpha = 0,5$ . Расходы на хранение сырья в количестве  $X_1 = 1$ ;  $X_2 = 1$  равны  $C(M_0) = 25$ . Вычислим значения компонент градиента.

$$\frac{\partial C(M_0)}{\partial X_1} = -2X_1 - X_2 - 2; \quad \frac{\partial C(M_0)}{\partial X_2} = 2X_2 - X_1 - 4; \quad \frac{\partial C'(M_0)}{\partial X_1} = -6; \quad \frac{\partial C'(M_0)}{\partial X_2} = -3.$$

Переходим к точке  $M_1(X_1^1, X_2^1)$ . Уравнение параметрических прямых имеет вид  $X_1^1 = 1 - 0,5(-0,6) = 4$ ;  $X_2^1 = 1 - 0,5(-0,3) = 2,5$ , откуда

$$\frac{\partial C(M_1)}{\partial X_1} = -1,5; \quad \frac{\partial C(M_1)}{\partial X_2} = -3; \quad C(M_1) = 9,25.$$

Разность  $|C(M_1) - C(M_0)| = 15,75 > \varepsilon$ , поэтому выполняем вторую итерацию – вычисляем значения целевой функции в точке  $M_1(X_1^2, X_2^2)$ :

$$X_1^2 = 4 - 0,5(-1,5) = 4,75; \quad X_2^2 = 2,5 - 0,5(-0,3) = 4;$$

$$\frac{\partial C(M_2)}{\partial X_1} = -1,5; \quad \frac{\partial C(M_2)}{\partial X_2} = -0,75; \quad C(M_2) = 5,31.$$

Поскольку  $|C(M_2) - C(M_1)| = 3,94 > \varepsilon$ , необходимо выполнить третью итерацию:

$$X_1^3 = 4,75 - 0,5(-1,5) = 5,5; X_2^3 = 4 - 0,5(-0,75) = 4,4; \frac{\partial C(M_3)}{\partial X_1} = -0,38;$$

$$\frac{\partial C(M_2)}{\partial X_2} = -4,74; C(M_3) = 4,31; |C(M_3) - C(M_2)| = 1 = \varepsilon.$$

Требуемая точность результата достигнута, процесс вычисления прекращается.  
Минимальные издержки на хранение при объемах сырья  $C(M_3) = 4631$  у. е.

#### 4.4 Нахождение экстремума функции отклика от многих переменных при наличии ограничений

Задача поиска экстремума функции отклика от многих переменных при наличии ограничений усложняется. Например, нужно найти минимум функции  $C(X)$ , при ограничениях  $h_j(X) = b_j; j = \overline{1, m}$ . При этом предполагается выполнение условий применения методов оптимизации: функции  $C(X)$  и  $h_j(X)$  обладают непрерывными частными производными по аргументам  $X_1, \dots, X_n$ . В таких случаях используется метод *неопределенных множителей Лагранжа*. Суть метода состоит в следующем. Составляется вспомогательная функция:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = C(X_1, X_2, \dots, X_n) + \sum_{j=1}^m \lambda_j (b_j - h_j(X_1, X_2, \dots, X_n)),$$

которая называется функцией Лагранжа, а множители  $\lambda_j, j = \overline{1, m}$  называются неопределенными множителями Лагранжа. Обозначим  $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  и запишем функцию Лагранжа в более компактном виде:

$$L(X, \Lambda) = C(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot (b_j - h_j(X)).$$

Эту функцию Лагранжа нужно минимизировать. Составим систему уравнений:

$$\frac{\partial L(X, \Lambda)}{\partial X_i} = \frac{\partial C(X)}{\partial X_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial h_j(X)}{\partial X_i} = 0; \quad i = \overline{1, n};$$

$$\frac{dL(X, \lambda)}{d\lambda_j} = b_j - h_j(X) = 0; \quad j = \overline{1, m}.$$

Как видим, идея метода неопределенных множителей Лагранжа заключается в том, что исходная задача отыскания условного экстремума целевой функции  $C(X)$  сводится к задаче безусловного экстремума функции Лагранжа  $L(X, \Lambda)$ , которая решается классическим методом – путем приравнивая к нулю частных производных по  $X_j; j = \overline{1, m}$  и  $\lambda_j; j = \overline{1, m}$ .

Отметим, что при применении метода неопределенных множителей Лагранжа также существуют следующие проблемы. Во-первых, для отыскания точек экстремума функции  $L(X, \Lambda)$  требуется проводить анализ

производных  $\frac{\partial^2 L(X, \Lambda)}{\partial X_i^2}$  и  $\frac{\partial^2 L(X, \Lambda)}{\partial \lambda_j^2}$ . Во-вторых, условия не являются

достаточными для существования решений  $X^*$ .

Простота составления функции Лагранжа и возможность обобщения задачи оптимизации на случай ограничений-неравенств обусловила широкое применение метода неопределенных множителей Лагранжа в современных исследованиях СС.

Итак, если нужно найти решение задачи методом неопределенных множителей Лагранжа, мы должны выполнить следующие действия:

- 1) составить функцию Лагранжа;
- 2) вычислить частные производные и приравнять их к нулю;
- 3) решить систему уравнений любым известным способом, получив тем самым стационарные точки;
- 4) исследовать функцию на наличие экстремума в полученных стационарных точках.

**Пример.** Найти прямоугольник наименьшего периметра, ограничивающий заданную площадь.

Математическая модель задачи имеет следующий вид:

«Найти  $\min f(x_1, x_2) = 2x_1 + 2x_2$  при ограничениях  $x_1 x_2 = s$ ;  $x_1 \geq 0$ ;  $x_2 \geq 0$ » .

Запишем функцию Лагранжа

$$L(x_1, x_2, \lambda) = 2x_1 + 2x_2 + \lambda(s - x_1 x_2)$$

и составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 - \lambda x_2 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} = 2 - \lambda x_1 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = s - x_1 x_2; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{2}{\lambda}; \\ x_2 = \frac{2}{\lambda}; \\ \lambda^2 s = 4. \end{cases}$$

Решение этой системы:

$$\begin{aligned} x_1^* &= \sqrt{s}; \\ x_2^* &= \sqrt{s}; \\ \lambda &= \frac{2}{\sqrt{s}}. \end{aligned}$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(справочное)

**Статистическое прогнозирование аварийности**

В таблице А.1 приведены некоторые типовые мероприятия по организации дорожного движения и ожидаемое снижение аварийности  $\Delta A$ , полученные по данным США [94] и бывшего СССР [95]. Знак « $\leftarrow$ » означает ухудшение безопасности, т. е. рост аварийности (только данного вида), тем не менее такие мероприятия всё же внедряются, поскольку позволяют значительно увеличить скорость движения или пропускную способность.

*Таблица А.1 – Типовые мероприятия по организации дорожного движения и ожидаемое снижение аварийности (по данным США и СССР)*

| Номер мероприятия | Мероприятие   | Город, загор од | Число полос | $\Delta A$ |                 |                        |
|-------------------|---|-----------------|-------------|------------|-----------------|------------------------|
|                   |   |                 |             | Все аварии | С пострадавшими | С материальным ущербом |
| 1                 | Запрещение стоянок  | Г               | >2          | 0,32       | 0,03            | –                      |
| 2                 | Разметка края ПЧ  | 3               | 2           | 0,14       | 0,17            | –                      |
| 3                 | Установка или корректировка расположения предупреждающих знаков         | Г               | 2           | 0,14       | 0,14            | –                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,20       | 0,26            | –                      |
|                   |   | 3               | 2           | 0,36       | 0,32            | –                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,18       | 0,03            | –                      |
| 4                 | Выделение разделительной полосы разметкой или выполнение ее приподнятой | Г               | >2          | 0,12       | –               | –                      |
| 5                 | Укладка дорожного покрытия (с реконструкцией)                           | Г               | >2          | 0,42       | 0,46            | –                      |
|                   |   | 3               | >2          | 0,12       | 0,21            | –                      |
| 6                 | Стабилизация обочин   | 3               | 2           | 0,44       | 0,59            | –                      |
| 7                 | Уширение обочин   | 3               | 2           | 0,38       | 0,46            | –                      |
| 8                 | Уширение ПЧ   | 3               | 2           | –0,20      | 0,07            | –                      |
| 9                 | Нанесение разделительной линии разметки на выпуклых вертикальных кривых | 3               | 2           | 0,38       | 0,30            | –                      |
| 10                | Нанесение разделительной линии разметки на вогнутых вертикальных кривых | 3               | 2           | 0,64       | –               | –                      |
| 10                | Установка или обновление предупреждающих или указательных знаков на     | 3               | 2           | 0,37       | 0,19            | –                      |

|             |  |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|--|
| перекрестке |  |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|--|

Продолжение таблицы А.1

| Номер мероприятия | Мероприятие   | Город, за город | Число полос | ΔА         |                 |                        |
|-------------------|---|-----------------|-------------|------------|-----------------|------------------------|
|                   |   |                 |             | Все аварии | С пострадавшими | С материальным ущербом |
| 10                | Установка или обновление предупреждающих или указательных знаков на перекрестке             | Г               | >2          | 0,09       | -0,07           | -                      |
|                   |   |                 | 2           | 0,20       | 0,51            | -                      |
| 11                | Установка знака «Стоп»  | Г               | >2          | 0,41       | 0,47            | 0,26                   |
| 12                | Установка знака «Стоп»  | З               | 2           | 0,47       | 0,96            | -                      |
| 12                | Установка перед перекрестком на второстепенной дороге знака «Проезд без остановки запрещен» | Г               | 2           | 0,48       | 0,71            | -                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,38       | 0,18            | 0,22                   |
| 13                | Установка предупреждающих сигналов  | З               | 2           | 0,65       | 0,89            | -                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,56       | 0,29            | -                      |
| 14                | Добавление пешеходных сигналов  | Г               | 2           | 0,13       | 0,56            | -                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,02       | 0,42            | -                      |
| 15                | Запрещение поворотов  | Г               | >2          | 0,40       | 0,39            | -                      |
| 16                | Выделение полосы для левых поворотов без светофорного регулирования                         | Г               | 2           | 0,19       | 0,8             | -                      |
|                   |   |                 | >2          | 0,06       | 0,54            | 0,18                   |
| 17                | Организация полосы для левых поворотов со светофорным регулированием                        | З               | >2          | -0,06      | -0,01           | -                      |
|                   |   |                 | Г           | >2         | 0,27            | 0,01                   |
| 18                | Установка дополнительной секции левого поворота без выделения отдельной полосы              | Г               | >2          | 0,43       | 0,58            | -                      |
|                   |   |                 | 2           | 0,38       | 0,57            | -                      |
| 19                | Установка дополнительной секции левого поворота с отдельной полосой                         | Г               | >2          | 0,46       | 0,76            | -                      |
|                   |   |                 | 2           | 0,46       | 0,76            | -                      |
| 20                | Организация светофорного регулирования  | Г               | >2          | 0,62       | 0,80            | 0,79                   |
| 21                | Установка светофора с ЖМС   | Г, З            | >2          | 0,77       | 0,85            | 0,70                   |
| 22                | Установка пешеходных ограждений свыше 100 м   | Г, З            | >2          | 0,87       | 0,61            | 0,64                   |
| 23                | Установка дорожных знаков   | Г, З            | >2          | 0,67       | 0,61            | 0,64                   |
| 24                | Строительство пешеходной дорожки  | Г, З            | 2+          | 0,72       | 0,78            | 0,77                   |
| 25                | Устройство велодорожки  | З               | 2+          | 0,80       | 0,84            | 0,93                   |
| 26                | Нанесение горизонтальной разметки   | Г               | 2+          | 0,62       | 0,62            | 0,84                   |

|    |   |   |    |      |      |      |
|----|---|---|----|------|------|------|
| 27 | Строительство подземного пешеходного перехода | Г | 4+ | 0,64 | 0,54 | 0,35 |
|----|---|---|----|------|------|------|

Окончание таблицы А.1

| Номер мероприятия | Мероприятие  | Город, загород | Число полос | ΔΔ         |                 |                        |
|-------------------|--|----------------|-------------|------------|-----------------|------------------------|
|                   |  |                |             | Все аварии | С пострадавшими | С материальным ущербом |
| 28                | Устройство заездного кармана для остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта | Г, З           | 2+          | 0,56       | 0,73            | 0,83                   |
| 29                | Введение одностороннего движения   | Г              | 2+          | 0,11       | 0,06            | 0,01                   |
| 30                | Устройство светофора для пешеходов   | Г              | 2+          | 0,50       | 0,74            | 0,93                   |
| 31                | Ограничение скорости ТС  | Г, З           | 2+          | 0,48       | 0,60            | 0,86                   |
| 32                | Введение координированного регулирования   | Г              | 2+          | -0,04      | 0,06            | 0,51                   |
| 33                | Освещение проезжей части   | Г              | 2+          | 0,67       | 0,60            | 0,20                   |
| 34                | Реконструкция перекрестка в кольцевой  | Г              | 2+          | 0,51       | 0,78            | 0,93                   |
| 35                | Устройство обозначенных пешеходных переходов   | Г              | 2+          | 1,00       | 1,00            | 0,96                   |
| 36                | Устройство шероховатого дорожного покрытия   | Г              | >2          | 0,20       | 0,15            | -                      |
| 37                | Устройство трясущих полос  | З              | 2           | 0,27       | 0,26            | 0,24                   |
| 38                | Установка тросового ограждения на разделительной полосе магистрали                         | З, Г           | >2          | -0,33      | -0,04           | -                      |
| 39                | Установка барьерных ограждений на разделительной полосе магистрали                         | Г, З           | >2          | -0,20      | -0,22           | -                      |
| 40                | Установка заграждений вдоль дороги для домашнего скота                                     | З              | 2+          | 0,90       | -               | -                      |
| 41                | Установка направляющих устройств на кривых в плане   | З              | 2           | 0,02       | 0,16            | -                      |
|                   |  |                | >2          | 0,52       | 0,10            | -                      |
| 42                | Реконструкция кривых в плане   | З              | 2           | 0,88       | 0,89            | 0,96                   |
| 43                | Строительство путепроводов   | Г, З           | 2+          | 0,97       | 0,20            | 0,27                   |
| 44                | Установка транспортных   | Г              | 2+          | 1,0        | 1,0             | 1,0                    |

|    |  |   |   |      |      |      |
|----|--|---|---|------|------|------|
|    | ограждений на мостах   |   |   |      |      |      |
| 45 | Реконструкция автодорог (расширение проезжей части и увеличение радиуса поворотов) | 3 | 2 | 0,37 | 0,58 | 0,98 |

В таблице А.2 приведены статистические данные по снижению аварийности в Российской Федерации и в Республике Беларусь [96, 97].

*Таблица А.2 – Статистическое прогнозирование аварийности по данным Республики Беларусь и РФ*

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|--|--|------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| <b>Кривые в плане</b>  |  |                        |
| Увеличение радиуса кривой в плане до нормативных значений                          | 0,67   | 0,63                   |
| Устройство виражей с уширением проезжей части                                      | 0,36   | 0,27                   |
| Улучшение видимости на кривых в плане  | 0,22   | 0,65                   |
| Устройство островка, регулирующего движение  | 0,34   | 0,59                   |
| Установка ограждений на кривых в плане   | 0,16   | 0,32                   |
| Установка направляющих устройств при числе полос движения:                         |  |                        |
| 2  | 0,14   | 0,16                   |
| более 2  | 0,52   | 0,10                   |
| Установка или обновление предупреждающих дорожных знаков при числе полос движения: |  |                        |
| 2  | 0,44   | 0,55                   |
| более 2  | 0,52   | 0,40                   |
| Установка предупреждающих знаков и направляющих устройств                          | 0,22   | 0,41                   |
| Устройство краевой и осевой разметки на кривых, установка знаков                   | 0,52   | 0,25                   |
| <b>Участки подъемов и спусков</b>  |  |                        |
| Устройство дополнительной полосы движения на подъем                                | 0,45   | 0,25                   |
| Нанесение разделительной линии на выпуклых кривых в продольном профиле             | 0,55   | 0,62                   |
| Установка ограждений на спусках  | 0,12   | 0,16                   |
| <b>Уширение проезжей части</b>   |  |                        |
| Без учета величины уширения, м   | 0,33   | 0,25                   |
| с 5 (6) до 7 (8)   | 0,30   | 0,22                   |
| » 7   » 9  | 0,34   | 0,25                   |

|  |      |      |
|--|------|------|
| » 7 » 11,25                            | 0,44 | 0,28 |
| <b>Увеличение числа полос движения</b> |      |      |
| с 2 до 3                               | 0,06 | 0,08 |
| » 2 » 4                                | 0,12 | 0,20 |
| » 4 » 6                                | 0,25 | 0,32 |

Продолжение таблицы А.2

| Мероприятие   | Снижение числа аварий в долях единицы ДА |                        |
|---|--|------------------------|
|   | Все аварии                               | Аварии с пострадавшими |
| <b>Уширение, устройство обочин</b>  |  |                        |
| Доведение геометрических параметров и поперечного уклона обочин до нормативных требований | 0,31                                     | 0,37                   |
| Уширение обочин на 2 м с доведением до нормативных требований:                            | 0,22                                     | 0,26                   |
| на 1,5 м с доведением до нормативных требований   | 0,20                                     | 0,24                   |
| на 1,0 м с доведением до нормативных требований   | 0,17                                     | 0,20                   |
| без учета величины уширения   | 0,20                                     | 0,24                   |
| Устройство обочин шириной до 1,0 м:   | 0,16                                     | 0,13                   |
| от 1,0 до 2,0 м   | 0,15                                     | 0,20                   |
| от 2,0 до 2,75 м  | 0,21                                     | 0,25                   |
| Устройство разделительной полосы  | 0,12                                     | 0,30                   |
| <b>Пересечения и примыкания</b>   |  |                        |
| Канализирование движения:   |  |                        |
| – на пересечениях   | 0,50                                     | 0,30                   |
| – примыканиях   | 0,10                                     | 0,05                   |
| – пересечениях и примыканиях со светофорным регулированием                                | 0,26                                     | 0,15                   |
| – устройство островков безопасности разметкой для левоповоротных потоков                  | 0,50                                     | 0,35                   |
| – устройство островков безопасности барьерного типа для левоповоротных потоков            | 0,58                                     | 0,38                   |
| Устройство осевой и красной разметки  | 0,20                                     | 0,27                   |
| Устройство переходно-скоростных полос   | 0,24                                     | 0,13                   |
| Установка дорожных знаков:  |  |                        |
| – предупреждающих   | 0,37                                     | 0,60                   |
| – знак 2.5 на второстепенных дорогах перед выездом на главную дорогу                      | 0,31                                     | 0,25                   |
| Сокращение количества примыканий  | 0,13                                     | 0,10                   |
| Устройство кольцевых пересечений  | 0,49                                     | 0,33                   |
| Введение светофорного регулирования:  |  |                        |
| – на пересечениях   | 0,52                                     | 0,40                   |
| – на примыканиях  | 0,26                                     | 0,20                   |
| Уширение проезжей части   | 0,20                                     | 0,15                   |
| Устройство (укрепление) обочин в зоне пересечений   | 0,13                                     | 0,10                   |

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| (примыканий) |  |  |
|--------------|--|--|

Продолжение таблицы А.2

| Мероприятие   | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|---|--|------------------------|
|   | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| <b>Железнодорожные переезды</b>   |  |                        |
| Установка дорожного знака 2.5   | 0,58   | 0,45                   |
| Установка ограждений  | 0,6  | 0,50                   |
| Установка автоматических шлагбаумов   | 0,84   | 0,70                   |
| <b>Площадки отдыха</b>  |  |                        |
| Строительство площадок отдыха   | 0,24   | 0,21                   |
| Устройство переходно-скоростных полос в зоне площадок отдыха                                      | 0,42   | 0,45                   |
| <b>Остановочный пункт маршрутного пассажирского транспорта (ОП МПТ)</b>                           |  |                        |
| Перенос ОП МПТ за пересечение (примыкание) с оборудованием заездным карманов, посадочной площадки | 0,20   | 0,26                   |
| Оборудование ОП МПТ заездными карманами, посадочными площадками                                   | 0,24   | 0,31                   |
| Оборудование ОП МПТ переходно-скоростными полосами, заездными карманами, посадочными площадками   | 0,34   | 0,44                   |
| <b>Дорожные знаки</b>   |  |                        |
| Установка предупреждающих знаков  | 0,26   | 0,41                   |
| знака «Ограничение скорости движения»   | 0,50   | 0,20                   |
| Изменение ограничений скорости движения, км/ч:  |  |                        |
| с 70 до 50  | 0,21   | 0,16                   |
| » 70 » 60   | 0,10   | 0,08                   |
| » 80 » 50   | 0,29   | 0,22                   |
| » 80 » 60   | 0,20   | 0,15                   |
| » 80 » 70   | 0,09   | 0,07                   |
| » 100 » 70  | 0,46   | 0,35                   |
| » 100 » 80  | 0,39   | 0,30                   |
| Установка дорожного знака 2.4   | 0,07   | 0,05                   |
| 2.5   | 0,32   | 0,25                   |
| Установка информационных панно «Аварийно-опасный участок»   | 0,20   | 0,15                   |
| <b>Дорожная разметка</b>  |  |                        |
| Устройство осевой разметки  | 0,23   | 0,20                   |
| Устройство краевой разметки   | 0,15   | 0,17                   |
| Устройство осевой и краевой линий разметки  | 0,36   | 0,28                   |
| Восстановление разметки скоростных полос  | 0,34   | 0,26                   |
| Установка знаков, нанесение разметки  | 0,44   | 0,34                   |



Продолжение таблицы А.2

| Мероприятие   | Снижение числа аварий в долях единицы ДА |                         |
|---|--|-------------------------|
|   | Все аварии                               | Аварии с пострадавшим и |
| <b>Дорожные ограждения, направляющие устройства</b>                                       |  |                         |
| Установка ограждений (независимо от типа)   | 0,19                                     | 0,25                    |
| у осветительных опор и опор связи   | 0,17                                     | 0,22                    |
| Установка направляющих устройств  | 0,26                                     | 0,27                    |
| <b>Электрическое освещение</b>  |  |                         |
| Устройство электрического освещения   | 0,26                                     | 0,25                    |
| освещения автопавильона   | 0,34                                     | 0,37                    |
| <b>Участки дорог в пределах населенных пунктов</b>  |  |                         |
| Устройство электрического освещения   | 0,60                                     | 0,50                    |
| Уширение проезжей части с 7,5 до 9,0 м  | 0,36                                     | 0,34                    |
| Укрепление обочин на всю ширину   | 0,23                                     | 0,20                    |
| Устройство шероховатой поверхностной обработки  | 0,28                                     | 0,31                    |
| Устройство тротуаров, пешеходных дорожек  | 0,30                                     | 0,23                    |
| Обустройство наземного пешеходного перехода знаками, разметкой                            | 0,33                                     | 0,10                    |
| Устройство велодорожек  | 0,11                                     | 0,15                    |
| Строительство пешеходного перехода в разных уровнях                                       | 0,24                                     | 0,15                    |
| Светофорное регулирование пешеходного движения  | 0,21                                     | 0,10                    |
| Оборудование стояночных площадок  | 0,14                                     | 0,18                    |
| Ограничение скорости движения   | 0,16                                     | 0,20                    |
| Установка пешеходных ограждений   | 0,20                                     | 0,27                    |
| Устройство разметки типа «зебра»  | 0,26                                     | 0,35                    |
| <b>Мосты</b>  |  |                         |
| Установка барьерных ограждений на мостах  | 0,32                                     | 0,42                    |
| Устройство разметки на мостах   | 0,22                                     | 0,30                    |
| <b>Покрытие проезжей части</b>  |  |                         |
| Устройство шероховатой поверхностной обработки  | 0,24                                     | 0,32                    |
| Повышение ровности дорожных покрытий (оценка ровности по толкочмеру) – на каждые 50 см/км | 0,18                                     | 0,24                    |
| <b>Восстановление покрытия (укладка нового дорожного покрытия)</b>                        |  |                         |
| При числе полос движения:   |  |                         |
| 2   | 0,24                                     | 0,21                    |
| более 2   | 0,44                                     | 0,59                    |
| Ямочный ремонт дорожного покрытия   | 0,17                                     | 0,22                    |

Продолжение таблицы А.2

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                         |
|--|--|-------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшим и |
| <b>Укрепление, расчистка обочин</b>  |  |                         |
| Укрепление обочин на ширину 1,0 м  | 0,20   | 0,30                    |
| Укрепление обочин на всю ширину (при нормативной ширине обочин)  | 0,31   | 0,46                    |
| Укрепление обочин без учета ширины и типа укрепления   | 0,30   | 0,36                    |
| Ямочный ремонт обочин и их подсыпка  | 0,16   | 0,20                    |
| Удаление с обочин мачт электрического освещения  | 0,11   | 0,18                    |
| Удаление с обочин деревьев, столбов  | 0,18   | 0,28                    |
| <b>Ямочный ремонт проезжей части, приведение состояния обочин в соответствие с нормативными требованиями, установка (ремонт) ограждений и знаков</b>   |  |                         |
| При числе полос движения: 2  | 0,26   | 0,31                    |
| 3  | 0,30   | 0,36                    |
| 4 и более  | 0,32   | 0,38                    |
| <b>То же, что в 1.19 с устройством поверхностной обработки и нанесением разметки</b>   |  |                         |
| При числе полос движения: 2  | 0,29   | 0,35                    |
| 3  | 0,32   | 0,39                    |
| 4 и более  | 0,37   | 0,44                    |
| <b>То же, что в 1.19 с устройством выравнивающего слоя покрытия</b>  |  |                         |
| При числе полос движения: 2  | 0,32   | 0,40                    |
| 3  | 0,36   | 0,42                    |
| 4 и более  | 0,42   | 0,50                    |
| <b>То же, что в 1.19 с укладкой нового дорожного покрытия при числе полос движения</b>   |  |                         |
| При числе полос движения: 2  | 0,34   | 0,41                    |
| 3  | 0,39   | 0,50                    |
| 4 и более  | 0,44   | 0,53                    |
| <b>Уширение проезжей части, м, (с устройством выравнивающего слоя, шероховатой обработки, нанесением разметки, ремонтом и (или) установкой ограждений и дорожных знаков, пешеходных дорожек)</b> |  |                         |
| с 5 (6) до 7,5   | 0,26   | 0,43                    |
| » 7,5 » 9 (10)   | 0,55   | 0,60                    |
| » 7,0 » 11,25  | 0,44   | 0,53                    |
| » 14,0 » 17 (18)   | 0,58   | 0,64                    |

Окончание таблицы А.2

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                         |
|--|--|-------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшим и |
| <b>Реконструкция и строительство дорог</b>                                       |  |                         |
| Смягчение продольных уклонов   | 0,27   | 0,34                    |
| Постройка второй проезжей части  | 0,30   | 0,40                    |
| Уширение мостов  | 0,37   | 0,30                    |
| Строительство пересечений в разных уровнях с автомобильными дорогами             | 0,96   | 0,40                    |
| Строительство пересечений в разных уровнях с железными дорогами                  | 0,86   | 0,80                    |
| Строительство обходов населенных пунктов   | 0,80   | 0,25                    |
| <b>Реконструкция участка дороги с улучшением трассы при числе полос движения</b> |  |                         |
| При числе полос движения: 2  | 0,72   | 0,68                    |
| 3  | 0,74   | 0,70                    |
| 4  | 0,75   | 0,72                    |

Протяженность зон влияния элементов дороги указана в таблице А.3.

Таблица А.3 – Зоны влияния конфликтных участков УДС

| Элементы дороги  | Зона влияния  |
|--|---|
| Подъемы и спуски   | 100 м за вершиной подъема<br>150 м после подошвы спуска |
| Пересечения в одном уровне   | В каждую сторону по 50 м                                |
| Кривые в плане с видимостью при $R > 400$ м (обеспеченной)   | В каждую сторону по 50 м                                |
| $R < 400$ м (необеспеченной)   | В каждую сторону по 100 м                               |
| Мосты и путепроводы  | В каждую сторону по 75 м                                |
| Участки в местах влияния боковых препятствий и с глубокими обрывами у дороги                         | В каждую сторону по 50 м                                |
| Участки подходов к тоннелям  | В каждую сторону по 150 м                               |
| Железнодорожный переезд на прямом горизонтальном участке   | 75 м  |
| Железнодорожный переезд в конце спуска более 30 % при длине спуска, м:<br>100; 200; 300; 400 и более | 100 м; 200 м; 200 м; 250 м                              |
| Кривые в плане менее 200 м на подходе к переездам  | 150 м   |
| ОП МПТ, пешеходные переходы и другие элементы дорог  | По 100 м в каждую сторону                               |

В таблице А.4 приведены статистические данные по снижению аварийности, полученные в процессе внедрения тех или иных мероприятий по организации дорожного движения в странах Евросоюза [98].

**Таблица А.4 – Статистическое прогнозирование аварийности по данным стран Евросоюза**

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|--|--|------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| <b>Проектные решения</b>   |  |                        |
| <b>Пешеходные и велосипедные дорожки</b>   |  |                        |
| Строительство новой пешеходной и велосипедной дорожки вдоль дороги или улицы   | 0,07   | 0,10                   |
| Физическое разделение транспортного и пешеходного (велосипедного) движения на дорогах и улицах (подземный переход, путепровод и т. д.)                     | –  | 0,30                   |
| <b>Автомобильные дороги и улицы</b>  |  |                        |
| Строительство новой магистрали   | 0,65   | 0,07                   |
| Строительство дороги с двумя проезжими частями вместо одной  | 0,20   | 0,07                   |
| Физические барьерные ограждения для предотвращения ослепления (дороги без искусственного освещения при среднесуточной интенсивности менее 15 000 авт./сут) | –  | 0,11                   |
| Строительство объездной дороги   | –  | 0,25                   |
| <b>Перекрестки и пересечения в разных уровнях</b>  |  |                        |
| Канализирование на пересечении на дорогах общего пользования или перекрестке городских улиц  | –  | 0,10                   |
| Канализирование на примыкании дорог общего пользования или городских улиц  | –  | 0,05                   |
| Строительство зоны обгона на примыканиях дорог общего пользования (улиц)   | –  | 0,05                   |
| Устройство круговой развязки   | 0,70   | 0,50                   |
| Улучшение геометрических параметров перекрестка:   |  |                        |
| – угол примыкания изменен на 90°   |  | 0,50                   |
| – уменьшение уклона на прилегающей улице   | –  | 0,20                   |
| Замена пересечения двумя примыканиями  | –  | 0,20                   |
| <b>Пересечения в разных уровнях</b>  |  |                        |
| Строительство развязки в двух уровнях вместо перекрестка   | –  | 0,50                   |

Продолжение таблицы А.4

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|--|--|------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| Увеличение радиуса на петле въезда на развязку   | 0,23   | –                      |
| Продление полос до 30 м:   |  |                        |
| – разгона  | 0,11   |                        |
| – торможения   | 0,07   | –                      |
| <b>Обустройство дорог</b>  |  |                        |
| Строительство барьерного ограждения:   |  |                        |
| – по краям ПЧ  |  | 0,44                   |
| – перед препятствием   |  | 0,69                   |
| – на центральном разделительном островке   | –  | 0,43                   |
| Устройство дополнительной полосы и центрального барьера  | –  | –                      |
| Устройство нового освещения дороги   | –  | 0,64                   |
| Замена жестких опор на гибкие (демпфирующие удар)  | –  | 0,50                   |
| Усиление интенсивности освещения в два раза  | –  | 0,08                   |
| Строительство заграждений, предохраняющих от выхода животных на проезжую часть   | –  | 0,15                   |
| Устранение препятствий в ближайшем окружении проезжей части  | –  | 0,15                   |
| <b>Улучшение параметров дороги</b>   |  |                        |
| Строительство протяженного центрального островка:  |  |                        |
| – на улице с четырехполосным движением   |  | 0,30                   |
| – на двухполосной улице  |  | 0,39                   |
| – на многополосной улице   | –  | 0,22                   |
| Уполаживание откосов на дорогах общего пользования   | –  | 0,15                   |
| Улучшение элементов плана и продольного профиля  | –  | 0,15                   |
| Повышение видимости путем срезки растительности на дорогах общего пользования  | –  | 0,10                   |
| Реконструкция дороги общего пользования  | –  | 0,20                   |
| Реконструкция дороги, проходящей по густонаселенному району  | –  | 0,07                   |
| Обозначение кривой малого радиуса  | –  | 0,20                   |
| <b>Содержание дорог и улиц</b>   |  |                        |
| Повышение класса содержания дороги на один класс на дорогах с интенсивностью движения тяжелого транспорта свыше 250 авт./сут | –  | 0,02                   |
| Повышенная готовность к выполнению работ по зимнему содержанию   | –  | 0,08                   |

Продолжение таблицы А.4

| Мероприятие  | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|--|--|------------------------|
|  | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| Установка нового или замена существующего дорожного знака  | –  | 0,40                   |
| <b>Организация и управление дорожным движением</b>   |  |                        |
| Организация подъездов к частному сектору   | –  | 0,10                   |
| Физическое обозначение правил проезда на перекрестке (знаки и т. д.)                                 | –  | 0,03                   |
| Введение знака «STOP» на перекрестке   | –  | 0,10                   |
| Введение светофоров на перекрестке   | –  | 0,15                   |
| Улучшение светофорного регулирования на перекрестке  | –  | 0,10                   |
| Введение пешеходных светофоров и центрального островка безопасности на пешеходном переходе           | –  | 0,07                   |
| Устройство искусственных неровностей на проезжей части улиц («лежачие полицейские»)                  | –  | 0,48                   |
| Введение в зонах жилой застройки ограничения скорости 30 км/ч и устройство искусственных неровностей | –  | 0,44                   |
| Устройство виброполос (шумовых полос) на подъездах к опасному месту                                  | –  | 0,33                   |
| Нанесение отсутствующей краевой линии разметки   | –  | 0,05                   |
| Устройство светоотражающих «кошачьих глазок» в покрытии  | –  | 0,08                   |
| Устройство светоотражающих придорожных столбиков на дорогах с ограничением скорости 100 км/ч         | –  | 0,05                   |
| Устройство отсутствующего пешеходного перехода   | –  | 0,05                   |
| Переход от парковки по типу «елочка» к парковке параллельно бордюрному камню                         | 0,35   | –                      |
| Переход от свободной стоянки к регулируемой по времени стоянке ТС                                    | 0,11   | –                      |
| Перевод улицы с двусторонним движением к улице с односторонним движением                             | –  | 0,01                   |
| Перенос трамвайной остановки с середины улицы к краю   | –  | 0,55                   |
| Щиты, информирующие водителей об их фактической скорости движения                                    | –  | 0,05                   |
| Переход от переезда в одном уровне к переезду в разных уровнях                                       | –  | 0,64                   |
| Устройство шлагбаумов на переезде в одном уровне   | 0,45   | 0,55                   |

Окончание таблицы А.4

| Мероприятие   | Снижение числа аварий в долях единицы $\Delta A$ |                        |
|---|--|------------------------|
|   | Все аварии                                       | Аварии с пострадавшими |
| <b>Введение ограничения скорости</b>  |  |                        |
| Введение режима ограничения скорости 60 км/ч вместо 80 км/ч   | 0,09   | 0,10                   |
| Снижение ограничения скорости со 100 до 80 км/ч   | 0,13   | 0,40                   |
| Введение ограничения скорости 40 км/ч в районе действия знака «густонаселенный район»                                 | –  | 0,22                   |
| Снижение ограничения скорости на 10 км/ч в зонах с ограничением 40–80 км/ч  | 0,09   | –                      |
| Зональное снижение ограничения скорости с 60 до 50 км/ч   | –  | 0,09                   |
| Введение ограничения скорости в центре города с 50 до 40 км/ч   | –  | 0,15                   |
| <b>Конструктивная безопасность, контроль и обучение</b>   |  |                        |
| Замена шин автомобилей с глубиной рисунка протектора 2–3 на 3–5 мм  | 0,09   | –                      |
| Использование ремней безопасности, %:   |  |                        |
| – водителями  |  | 50                     |
| – пассажирами на переднем сидении   |  | 45                     |
| – пассажирами на заднем сидении   | –  | 25                     |
| Применение светоотражателей пешеходами  | –  | 0,85                   |
| Использование велосипедных шлемов   | –  | 0,50                   |
| Использование мотоциклетных шлемов на мопедах   | –  | 0,44                   |
| Использование детских автомобильных сидений (кресел)  | –  | 0,39                   |
| Использование детьми ремней безопасности  | –  | 0,19                   |
| Увеличение интенсивности контроля ТС на дороге на 50 %  | 0,02   | –                      |
| Разрешение водителям-новичкам управлять ТС только в период с 6 утра до 10 вечера                                      | 0,06   | –                      |
| Обучение детей 6–12 лет правильно переходить дорогу   | –  | 0,13                   |
| В три раза более частое использование радаров для измерения скорости  | –  | 0,07                   |
| Установка и управление автоматической камерой видеонаблюдения за скоростью на дороге                                  | –  | 0,30                   |
| Установка и управление камерами контроля на светофорах (проезд на красный)  | –  | 0,12                   |
| Введение системы учета правонарушений (определенное количество штрафных баллов ведет к лишению прав на управление ТС) | –  | 0,17                   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

### Моделирование дорожного движения с использованием Transyt-7FR

В приложении рассмотрена задача максимизации пропускной способности участка ДС при сложившихся транспортных и пешеходных потоках. Решение поставленной задачи позволяет снизить образование транспортных заторов на магистральном направлении, уменьшить число остановок ТС, снизить расход топлива, уменьшить экологический вред и пр.

Оценка эффективности метода была проведена на микроскопической модели фрагмента транспортной сети в демоверсии программы TRANSYT-7FR [60, 61]. В качестве объекта исследования использован регулируемый перекресток улиц Мазурова, Кожара и Бородина в г. Гомеле [68].

#### Б.1 Общая характеристика программы

Программный пакет Transyt-7FR позволяет оптимизировать режимы работы светофорных объектов, выполняя микромоделирование ТП в течение малых интервалов времени с учетом возможности изменения параметров планов координации.

Важными свойствами оптимизационного процесса являются:

- широкие возможности применения различных приемов поиска (связанных с методом кратчайшего спуска и генетическим алгоритмом);
- разнообразие подлежащих оптимизации целевых функций в различных сочетаниях (например, комбинации функций беспрепятственного движения, задержки, остановки, расхода топлива, пропускной способности и накопления очереди);
- способность оптимизировать параметры длительности цикла и выбора последовательности, длительности и смещения фаз.

Следует отметить способность пакета Transyt-7FR анализировать двоянные циклы, множественные фазы зеленого сигнала, повороты направо на красный свет, нерегулируемые перекрестки, полосы для МТС и «привилегированные полосы», запрещенные повороты налево, ограничения пропускной способности и степень насыщения по направлениям движения при использовании полностью активной схемы управления.

Программа способна анализировать до 7 однокольцевых фаз сигналов на одном перекрестке (рисунок Б.1).

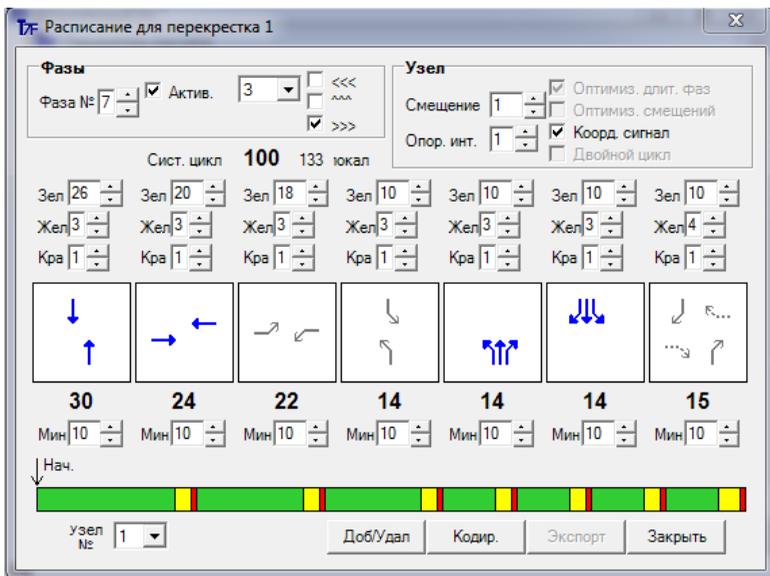


Рисунок Б.1 – Пример анализа 7 однокольцевых фаз сигналов

С помощью программы возможно моделирование пересечений со сложной геометрией до 7 полос на каждом подъезде (рисунок Б.2).

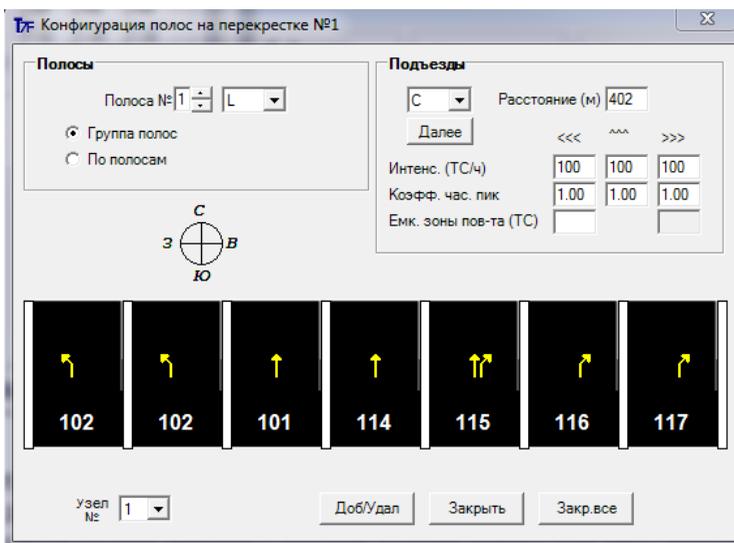


Рисунок Б.2 – Пример моделирования пересечения со сложной геометрией

Существует возможность импорта или экспорта данных из других программ, таких как HCS+, TSIS, AUMSUN, ArteryLite.

В качестве практического примера, реализующего основные возможности программы, будет выполнена оптимизация светофорного регулирования на пересечении улиц Мазурова, Кожара и Бородина в г. Гомеле.

## Б.2 Исходные данные

Масштабный план (М1:500) перекрестка улиц Мазурова, Кожара и Бородина представлен на рисунке Б.3.

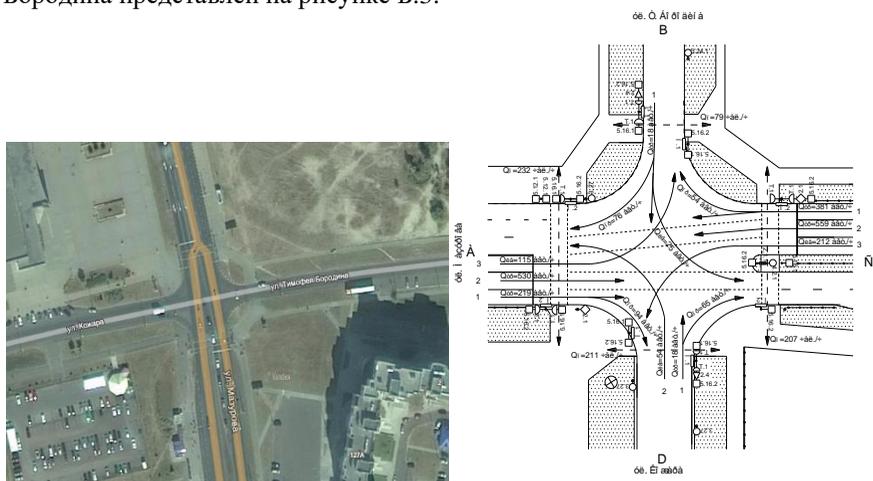


Рисунок Б.3 – Регулируемый перекресток улиц Мазурова, Кожара и Бородина в г. Гомеле

В качестве исходных данных для работы пакета Transyt-7FR необходимо собрать следующую информацию о перекрестке:

- геометрические характеристики (ширина проезжей части, количество полос на каждом подходе, расположение пешеходных переходов, разрешенные направления транспортных средств и пешеходов, расположение ОП МТС, наличие выделенных полос для МТС);

- схема организации движения на перекрестке (размещение знаков, светофоров, островков безопасности, направляющих устройств, дорожных и пешеходных ограждений и т. д.);

- схема светофорного регулирования (схема пофазного движения, диаграмма светофорного регулирования, количество фаз и их длительность);

- интенсивность движения ТС во всех разрешенных направлениях (авт./ч), состав транспортного потока (доля легковых, грузовых ТС, МТС).

В результате натурного обследования были определены следующие характеристики исследуемого участка ДС.

1 В нерегулируемом режиме ул. Мазурова является главной, ул. Кожара и Бородина – второстепенными. Установлены дорожные знаки приоритета 2.1 «Главная дорога» и 2.4 «Уступить дорогу».

2 На главной дороге имеется по две полосы движения в каждом направлении (ширина полосы – 3,5 м), на подъезде к перекрестку имеются дополнительные для поворота налево или разворота. На входе А (рисунок Б.3) встречные ТП разделяет разделительная зона (плавно переходящая в разметку 1.3), на входе С – разделительная полоса. Для обеспечения безопасного пересечения проезжих частей пешеходами имеется островок безопасности по улице Мазурова (вход С).

3 На ул. Кожара общая ширина проезжей части составляет 12 м, общее количество полос – три (две в направлении перекрестка), ширина полосы движения составляет 4 м.

На ул. Бородина общая ширина проезжей части – 9 м, общее количество полос – две, ширина полосы движения – 4,5 м (на ул. Кожара и на ул. Бородина дорожная разметка отсутствует, поэтому количество полос определено в соответствии с п. 75 главы 10 ПДД).

4 Пешеходные переходы устроены под прямым углом к оси проезжей части, обозначены дорожными знаками 5.16.1 и 5.16.2 «Пешеходный переход». На входе С дублирующий знак 5.16.1 установлен слева от каждой из проезжих частей на разделительной полосе (островке безопасности) на дальней границе перехода.

5 На выходах с перекрестка на ул. Мазурова размещены ОП МТС, оборудованные заездными карманами, обозначенные дорожными знаками 5.12.1 «Остановочный пункт автобуса и (или) троллейбуса».

6 На ул. Мазурова установлены ограничивающие пешеходные ограждения, а на ул. Кожара – удерживающие пешеходные ограждения.

7 Основными объектами тяготения пешеходов на перекрестке являются ОП МТС, Ледовый дворец и жилые дома.

8 Максимальная разрешенная скорость движения на подходах к перекрестку – 60 км/ч.

9 Схема светофорного регулирования на перекрестке – двухфазная с длительностью цикла 87 с. Схема пофазного движения и диаграмма светофорного регулирования представлены на рисунке Б.4.

10 На перекрестке движение ТП регулируется транспортными светофорами Т.1. Переход проезжей части на всех входах осуществляется по пешеходным переходам, регулируется светофорами П.2 на переходах через ул. Мазурова и светофорами П.1 на переходах через ул. Кожара и ул. Бородина (рисунок Б.5)

Длительность зеленого мигающего сигнала в транспортных светофорах составляет 3 с.

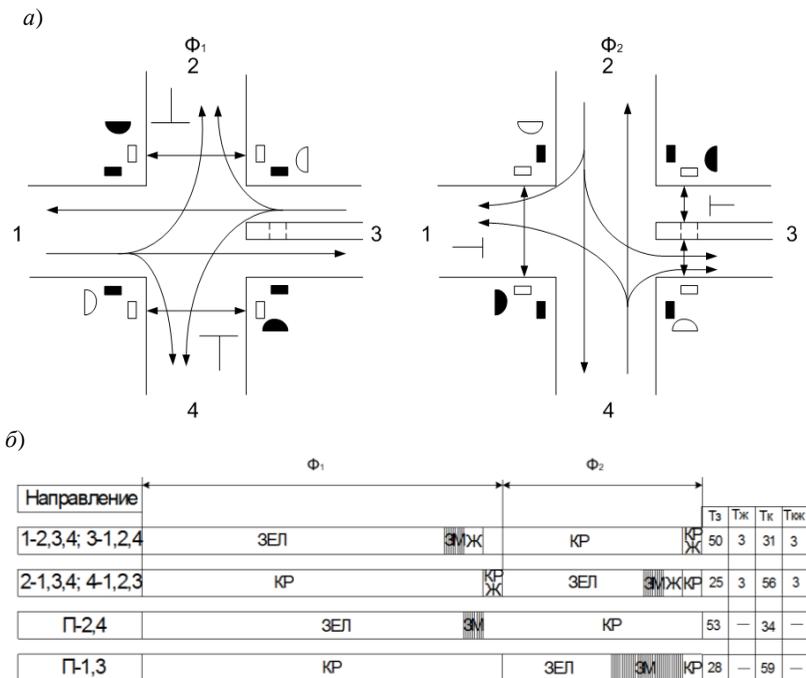


Рисунок Б.4 – Схема пофазного движения (а) и диаграмма регулирования (б) перекрестка:

Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub> – соответственно первая и вторая фазы регулирования;

1–4 – направления движения на перекрестке; П – пешеходные потоки

Длительность сигналов пешеходных светофоров на переходах через ул. Кожара и Бородина: зеленый – 50 с, зеленый мигающий – 3 с, красный – 34 с. Длительность сигналов пешеходных светофоров на переходах через ул. Мазурова: зеленый – 17 с, зеленый мигающий – 11 с, красный – 59 с.

11 Исследование интенсивности и состава ТП производилось на перекрестке, в течение 10 светофорных циклов с каждого входа (период времени с 17:00 до 18:00). Результаты расчета числа ТС по каждому циклу измерений приведены в таблице Б.1.

12 Основные ТП через перекресток следуют по ул. Мазурова. Наибольшую долю составляют легковые автомобили. Осуществляется движение МТС (автобусов, троллейбусов, маршрутных такси). Транспортный поток на ул. Кожара и ул. Бородина практически на 100 % состоит из легковых автомобилей.

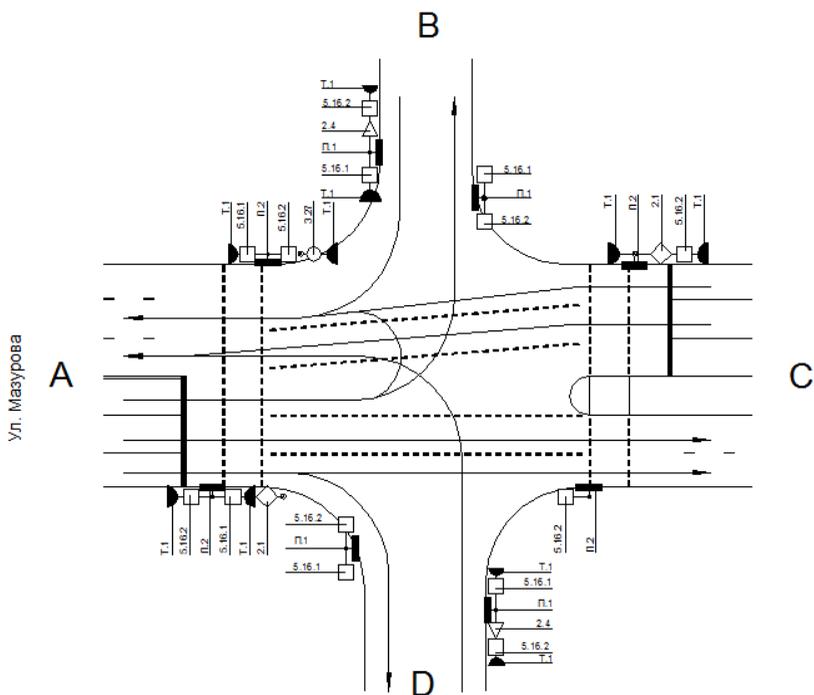


Рисунок Б.5 – Эскизный план исследуемого перекрестка

Таблица Б.1 – Расчет числа ТС, въехавших с каждого входа на перекресток для каждого цикла по направлениям

| Ном<br>ер<br>цик-<br>ла | Вход       |       |             |            |       |             |            |       |             |            |       |             |
|-------------------------|------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|
|                         | А          |       |             | В          |       |             | С          |       |             | D          |       |             |
|                         | налев<br>о | прямо | направ<br>о |
| 1                       | 3          | 15    | 4           | –          | –     | 2           | 5          | 21    | 3           | 1          | –     | 2           |
| 2                       | 5          | 16    | 2           | –          | –     | 1           | 5          | 18    | 1           | –          | 1     | 2           |
| 3                       | 4          | 23    | 2           | 1          | –     | 2           | 6          | 17    | 1           | 4          | 1     | 1           |
| 4                       | 2          | 16    | –           | –          | 1     | 2           | 6          | 31    | 1           | –          | –     | –           |
| 5                       | 1          | 7     | 1           | 1          | 2     | –           | 3          | 16    | 3           | 2          | –     | 4           |
| 6                       | 2          | 25    | 3           | –          | –     | 2           | 5          | 19    | 1           | 3          | –     | 1           |
| 7                       | 2          | 14    | 2           | 3          | 1     | 5           | 6          | 23    | –           | –          | –     | –           |
| 8                       | 5          | 16    | 3           | 1          | –     | 1           | 3          | 35    | –           | 3          | –     | 1           |
| 9                       | 3          | 28    | 5           | –          | –     | 1           | 6          | 32    | 1           | –          | 1     | 2           |
| 10                      | 1          | 21    | 1           | –          | –     | 2           | 6          | 15    | 2           | –          | 1     | 3           |
| ∑                       | 28         | 181   | 23          | 6          | 4     | 18          | 51         | 227   | 13          | 13         | 4     | 16          |

Средняя интенсивность ПП движения ( $q$ , авт./с и  $Q$ , авт./ч) по направлениям определяется по формулам

$$q_{\text{пр}} = \frac{n_{\text{пр}}}{\sum t_z}; Q_{\text{пр}} = 3600q_{\text{пр}};$$

$$q_{\text{лв}} = \frac{n_{\text{лв}}}{\sum t_z}; Q_{\text{лв}} = 3600q_{\text{лв}};$$

$$q_{\text{тр}} = \frac{n_{\text{тр}}}{\sum t_z}; Q_{\text{тр}} = 3600q_{\text{тр}},$$

где  $\sum t_z$  – суммарное время измерений, с.

Средняя интенсивность движения по направлениям для входа А:

– левоповоротных –

$$q_{\text{лв}} = \frac{28}{870} = 0,032 \text{ авт./с}; Q_{\text{лв}} = 3600 \cdot 0,032 = 115 \text{ авт./ч};$$

– транзитных –

$$q_{\text{тр}} = \frac{181}{870} = 0,208 \text{ авт./с}; Q_{\text{тр}} = 3600 \cdot 0,208 = 749 \text{ авт./ч};$$

– правоповоротных –

$$q_{\text{пр}} = \frac{23}{870} = 0,026 \text{ авт./с}; Q_{\text{пр}} = 3600 \cdot 0,026 = 94 \text{ авт./ч}.$$

Результаты расчета средней интенсивности движения по направлениям для остальных входов представлены в таблице Б.2.

Таблица Б.2 – Средняя интенсивность движения по направлениям

| Интенсивность            | Вход  |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                          | А     | В     | С     | Д     |
| $q_{\text{лв}}$ , авт./с | 0,032 | 0,007 | 0,059 | 0,015 |
| $Q_{\text{лв}}$ , авт./ч | 115   | 25    | 212   | 54    |
| $q_{\text{тр}}$ , авт./с | 0,208 | 0,005 | 0,261 | 0,005 |
| $Q_{\text{тр}}$ , авт./ч | 749   | 18    | 940   | 18    |
| $q_{\text{пр}}$ , авт./с | 0,026 | 0,021 | 0,015 | 0,018 |
| $Q_{\text{пр}}$ , авт./ч | 94    | 76    | 54    | 65    |

Результаты замера интенсивности движения пешеходов на пешеходных переходах с каждого входа в течение 10 светофорных циклов, на основании таблицы Б.2, представлены в таблице Б.3.

На основании проведенных измерений подсчитаем значение интенсивности движения пешеходов, чел./ч,

$$Q_{\text{п}} = \frac{n_z}{t_{\text{изм}}} \cdot 3600,$$

где  $t_{\text{изм}}$  – суммарное время измерений, с.

Таблица Б.3 – Результаты замера интенсивности движения пешеходов

| Вход |    |    |    |
|------|----|----|----|
| A    | B  | C  | D  |
| 56   | 19 | 50 | 51 |

Интенсивность движения пешеходов для входа А:

$$Q_{п} = \frac{56}{870} \cdot 3600 = 232 \text{ чел./ч.}$$

Результаты расчета интенсивности движения пешеходов для каждого входа представлены в таблице Б.4.

Таблица Б.4 – Интенсивность движения пешеходов

| Вход |    |     |     |
|------|----|-----|-----|
| A    | B  | C   | D   |
| 232  | 79 | 207 | 211 |

По результатам исследования построим картограмму интенсивностей транспортных и пешеходных потоков приведенную на рисунке Б.6.

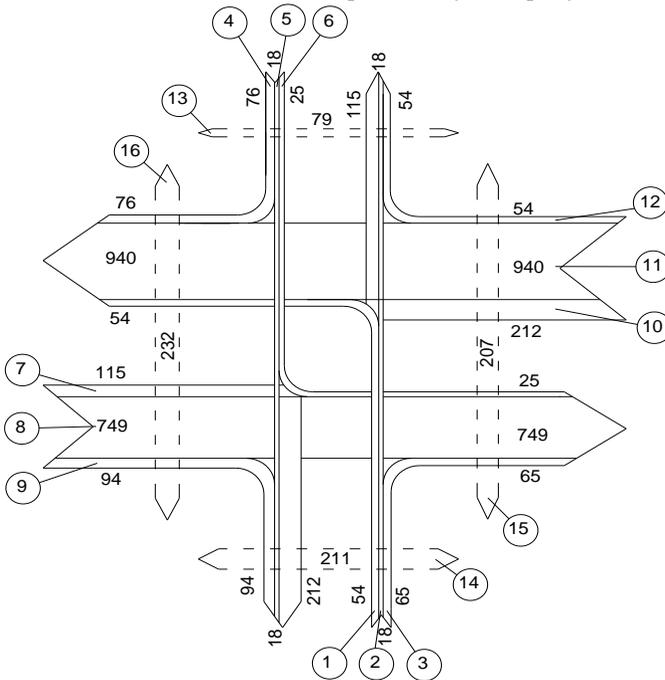


Рисунок Б.6 – Картограмма интенсивностей транспортных, чел./ч, и пешеходных, авт./ч, потоков

### Б.3 Последовательность расчета одного перекрестка

Первый шаг – создание модели регулируемого перекрестка в среде Transyt-7FR с помощью Меню «Файл» – «Создать» (рисунок Б.7).

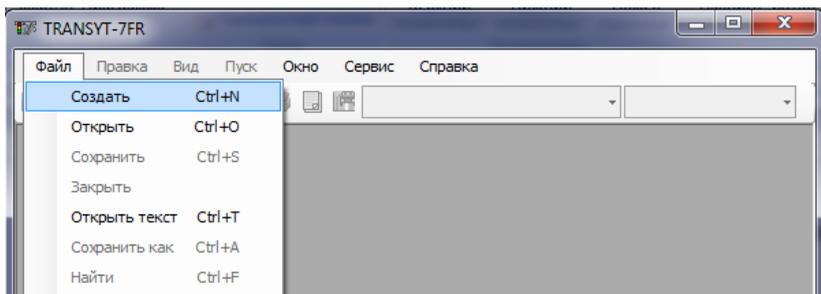


Рисунок Б.7 – Меню «Файл»

Заполняем исходные данные в окне «Создание входного файла Transyt» (рисунок Б.8).

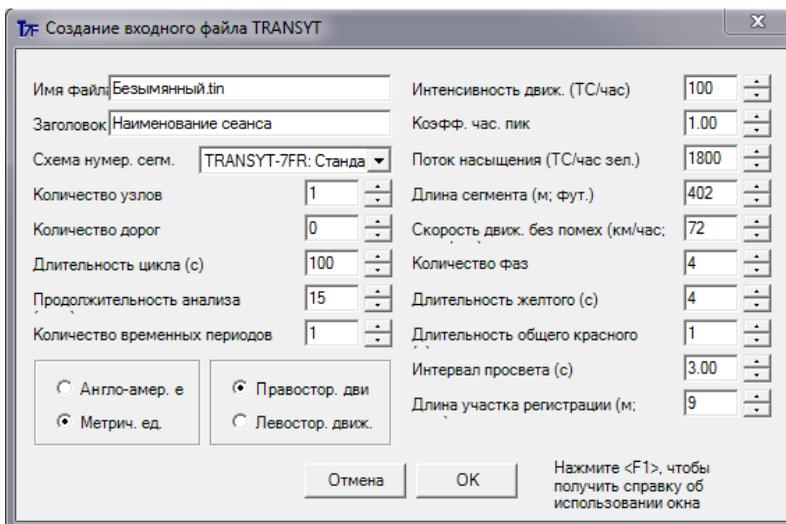


Рисунок Б.8 – Создание входного файла Transyt

На приведенном выше рисунке Б.8 иллюстрируется ряд значений параметров, предлагаемых по умолчанию для нового файла.

Основные элементы окна.

1 *Имя файла.* Файл под указанным здесь именем будет содержать входные данные. Программа ориентирована на использование файлов формате *.tin*. Необходимо изменить основную часть имени файла (Безымянный), но расширение *.tin* оставить без изменений.

2 *Заголовок.* Название включается в начало входного файла и верхнюю часть выходных отчетов.

3 *Схема нумерации сегментов.* Выбранная схема применяется к создаваемому набору данных. Узел представляет перекресток, а сегмент – направления движения транспорта между двумя узлами. Схема нумерации сегментов или узлов может быть выбрана совершенно произвольно. Вариант рекомендуемой схемы показан на рисунке Б.9 («xx» обозначает здесь числовой номер узла в интервале 01–99).

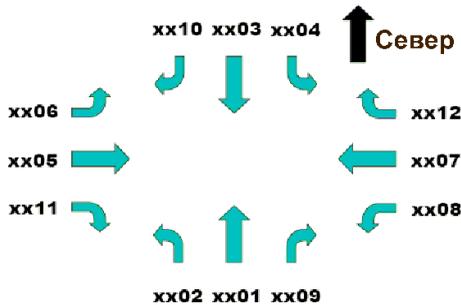


Рисунок Б.9 – Стандартная схема нумерации сегментов или узлов

Схема нумерации сегментов имеет название NEMA (рисунок Б.10).

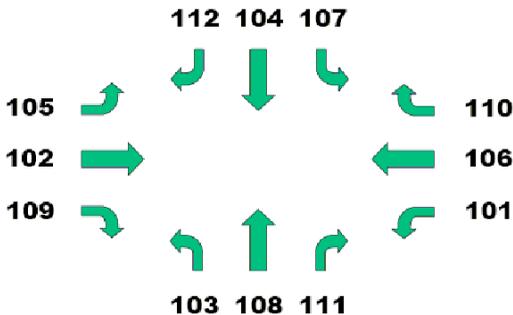


Рисунок Б.10 – Схема нумерации сегментов или узлов NEMA

Если схема не определена пользователем, программа по умолчанию выбирает стандартную схему. В большинстве случаев Transyt-7FR подразумевает реализацию схемы нумерации сегментов, используя числа от

1 до 12. Отсюда следует, что номера с 13-го и выше оказываются доступны для обозначения дополнительных полос, направлений движения или подъездов к перекресткам, которые не укладываются в типовой набор из 12 направлений (по 3 (прямо, налево, направо) для каждого входа).

Сегмент может состоять из одного или более направлений и охватывать одну или несколько полос. Программа требует использовать индивидуальные сегменты для каждого направления, которые имеют следующие характеристики:

- обладают отдельными полосами или зонами специального назначения;
- отличаются от смежных полос особыми параметрами интенсивности движения или накопления очереди;
- характеризуются нетипичным распределением фаз;
- делят общую полосу с направлением движения прямо или на поворот (и повороту оппонирует встречное прямое направление).

4 *Количество узлов*: узлы в указанном количестве создаются в новом наборе данных. Позже пользователь может добавить или удалить узлы средствами карты или с помощью соответствующих команд подменю «Правка» – «Дополнительно» – «Узлы».

5 *Количество дорог*: дороги, допускающие организацию беспрепятственного движения (в указанном количестве создаются в новом наборе данных).

6 *Длительность цикла*: задается общая длительность цикла.

7 *Продолжительность анализа*: параметр определяет значение длительности сеанса имитации. Исходя из эмпирических соображений, по умолчанию предлагается величина 15 минут, поскольку в течение такого промежутка времени дорожно-транспортные условия можно считать постоянными. Значение можно изменить позже с помощью окна «Параметры расчета», воспользовавшись командой меню «Правка – Анализ».

8 *Количество временных периодов*: программа допускает наличие до 9 временных периодов в расчете на файл данных. Для добавления или удаления периодов предназначены соответствующие команды подменю «Сервис – Период времени».

9 *Англо-американские и метрические единицы*: задаются единицы представления данных в выходных отчетах. При необходимости выбор можно изменить, обратившись к окну «Параметры расчета».

10 *Правостороннее и левостороннее движение*: при установке флажка предполагается использование правил правостороннего или левостороннего движения.

11 *Интенсивность движения*: определяется интенсивность движения ТС по умолчанию для каждого направления движения. Обычно указываются часовые величины (ТС/ч), даже если продолжительность анализа составляет всего 15 минут.

12 *Коэффициент пиковой нагрузки*: задается коэффициент часа пик, принимаемый по умолчанию для каждого направления движения. Если коэффициент меньше 1.00, это значит, что требуется смоделировать пиковый период внутри часового интервала, когда система испытывает несколько большую нагрузку в сравнении с типовой.

13 *Поток насыщения*: в этом поле задается величина интенсивности потока насыщения, предлагаемая по умолчанию для нового набора данных. Возможно изменение уровня потока насыщения для отдельных направлений движения с помощью диалоговых окон, вызываемых командами меню «Правка – Движение», «Правка – Полосы» или «Правка – Дополнительно – Пропускная способность».

14 *Длина сегмента*: значение представляет расстояние между смежными перекрестками, предлагаемое по умолчанию. Длину отдельного сегмента можно изменить с помощью экранов, вызываемых командами меню «Правка – Полосы» или «Правка – Движение».

15 *Скорость движения без помех*: вводится скорость движения ТС без помех, предусмотренная по умолчанию для нового набора данных. Величина влияет на расход топлива и существенным образом воздействует на результат моделирования беспрепятственного движения.

16 *Количество фаз*: в поле указывается количество фаз в цикле регулирования. Число должно принадлежать интервалу 2–7. Возможно добавление или удаление фаз для каждого отдельного перекрестка, применяя команду меню «Правка – Расписание».

17 *Длительность желтого*: поле служит для ввода длительности желтого сигнала светофора.

18 *Длительность «общего красного»*: задается длительность «общего красного» сигнала для всех направлений движения. «Общий красный» сигнал не является обязательным для применения, поэтому допустимо вводить нулевую величину.

19 *Интервал просвета*: величина интервала просвета влияет на подсчет случайной транспортной задержки. Величина интервала просвета влияет на подсчет случайной задержки и способна потенциально влиять на расчет длительностей фаз при использовании модели оценки активной схемы управления. Если создаваемая сеть полностью отвечает модели

предопределенного управления, параметр оказывается неуместным и им можно пренебречь.

20 *Длина участка регистрации*: в поле задается длина участка регистрации детектором наличия ТС, предусмотренная по умолчанию для нового набора данных. Позже значения для определенных сегментов можно изменить, если обратиться к команде меню «Правка – Дополнительно – Активные схемы». Длина участка регистрации способна потенциально влиять на расчет длительностей фаз при использовании модели оценки активной схемы управления. Если создаваемая сеть полностью отвечает модели предопределенного управления, параметр оказывается неуместным и им можно пренебречь.

Второй шаг – **ввод основных параметров**.

Перекресток на пресечении ул. Мазурова, Кожара и Бородина в г. Гомеле соответствует модели предопределенного управления: способ функционирования регулируемого перекрестка, при котором длительность цикла, порядок включения фаз светофорного регулирования и их длительность зафиксированы.

Окно «Ввод основных параметров» (рисунок Б.11):

- имя файла – Модель перекрестка .tin;
- заголовок – Модель перекрестка;
- схема нумерации – оставляем без изменения;
- количество перекрестков – 1;
- количество дорог – 0;
- длительность цикла, с, – 87;
- период анализа, мин, – 15;
- количество временных отрезков – 1;
- метрическая система мер – ставим флажок;
- правостороннее движение – ставим флажок;
- интенсивность движения, ТС/ч, – 100;
- поправка на часы пик – так как исследование интенсивности на перекрестке проводилось в пиковый период, поправка на часы пик будет составлять 1,00;
- интенсивность движения, ТС/ч, – 1800;
- длина сегмента, м, – оставляем без изменения;
- скорость свободного потока машин, км/ч, – 60;
- количество фаз – 2;
- длительность желтого, с, – 3;
- длительность красного, с, – 0;
- разрыв между ТС, с, и длина участка детектирования – оставляем без изменения, так как создаваемый перекресток отвечает модели предопределенного управления.

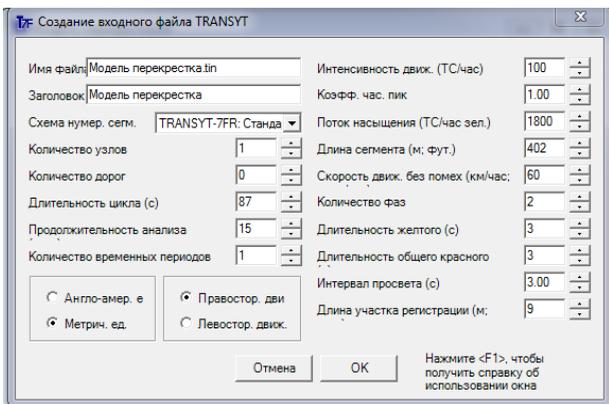


Рисунок Б.11 – Ввод соответствующих параметров

После заполнения – нажимаем клавишу «ОК».

Третий шаг – **создание полос движения**. Используем меню «Правка – Полосы». Создаем полосы во всех направлениях: север, юг, запад, восток (рисунок Б.12). Также можно выбрать команду меню «Правка – Полосы – Все подъезды», которая приводит к автоматическому открытию четырех экземпляров окна, по одному на каждый из подъездов к перекрестку.

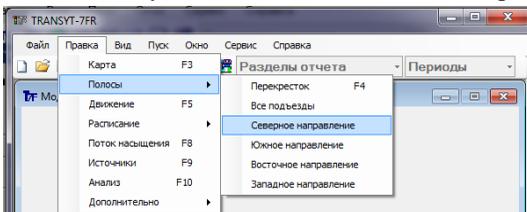


Рисунок Б.12 – Меню «Правка – Полосы»

Ни рисунке Б.13 показано начальное окно «Конфигурации полос» для северного направления.

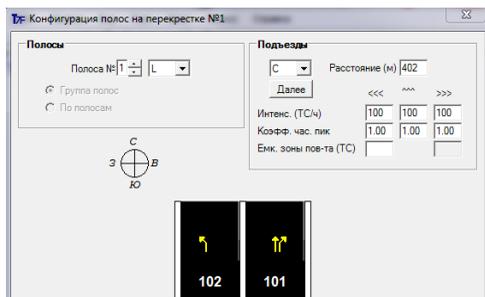


Рисунок Б.13 – «Конфигурации полос»

Рассмотрим подробнее параметры окна.

1 Полоса №: поле ввода задает номер полосы, служащей объектом манипуляций. Полоса № 1 всегда является крайней слева в направлении подъезда. Щелчок на любой полосе в пределах графической диаграммы в нижней части окна вызывает автоматическое обновление номера в данном поле.

2 Использование полосы: раскрывающийся список содержит перечень опций использования полосы, номер которой выбран в соседнем поле ввода (рисунок Б.14): L – движение налево, T – прямо, R – направо, LT – налево и прямо, LR – налево и направо, TR – прямо и направо, LTR – движение налево, прямо и направо.

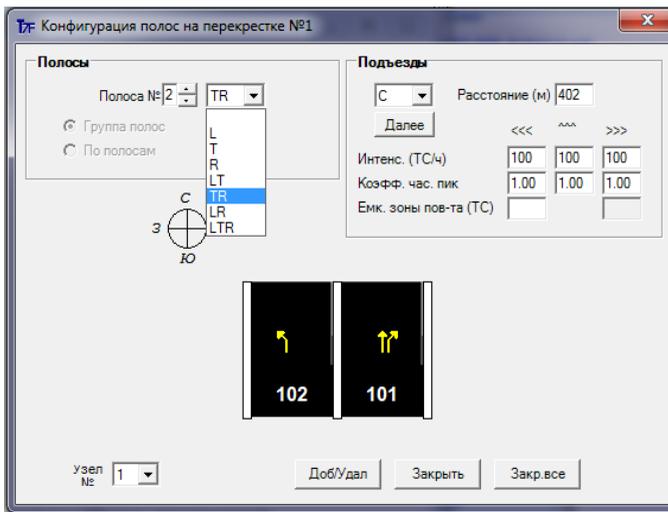


Рисунок Б.14 – Использование полосы

Тип анализа: переключатель позволяет выбирать один из вариантов анализа – «Группа полос» (в стиле НСМ: обеспечивает исследователей и практиков, занимающихся дорожно-транспортными проблемами, системой процедур оценки качества обслуживания ТП магистралями и прочей дорожной инфраструктурой) или (более точный) «По полосам». Выбор принимается во внимание только в том случае, если конкретное направление движения допускается для более чем одной полосы на подъезде. В ситуации, когда направлению отведена единственная полоса, анализ в любом случае сводится к варианту «По полосам», и переключатель автоматически блокируется.

Когда использование полос в группе общих полос достаточно

равномерно, то вся группа моделируется как единый сегмент. Если же характер движения по полосам значительно различается, то для представления каждой полосы определяется отдельный сегмент.

3 Направление подъезда: в раскрывающемся списке указываются направления подъезда к перекрестку.

4 Расстояние: поле ввода задает расстояние на текущем подъезде к перекрестку от предыдущего перекрестка. Обычно расстояние принимается равным для всех направлений движения (влево, прямо и вправо). Если одно из направлений отличается, то расстояние можно ввести на экране «Движение», открываемом командой меню «Правка – Движение».

Считается, что зоны поворота обладают общей длиной сегмента, совпадающей с длиной смежного сегмента прямого направления. Для зон поворота полное расстояние от светофора до светофора также определяется как длина сегмента, чтобы обеспечить корректную имитацию. Длина зоны поворота задается в поле «Емкость зоны поворота».

5 Интенсивность: указывается интенсивность движения на каждом направлении сегмента. Любые значения интенсивности, вводимые для направлений влево, прямо и вправо средствами окна конфигурации полос, сохраняются и автоматически загружаются в окне «Движение», поэтому нет необходимости задавать одни и те же данные дважды на обоих экранах в час (ТС/ч). Величина задает общее количество ТС, включая другие типы (автобусы, грузовые и специальные) автомобилей.

При выполнении анализа по полосам в условиях, когда несколько номеров сегментов используется для представления одного направления движения, в рассматриваемом поле ввода отображается суммарное значение.

Если в качестве единицы измерения принято число ТС за период времени (ТС/период), тогда в этом окне или на экране «Движение» кодируется количество автомобилей, прибывающих в течение текущего периода. «Текущий период времени» отображается в поле-списке «Периоды». Предположим, что для некоторого конкретного направления в реальных условиях была подсчитана интенсивность, составившая 100 автомобилей за 15-минутный период. В таком случае величину 100 можно ввести в окне конфигурации полос. Режим кодирования в единицах ТС за период времени можно выбрать, установив соответствующий флажок в окне «Параметры» (меню «Сервис – Параметры») (рисунок Б.15).

6 Коэффициент часа пик: поле ввода предназначено для задания коэффициента часа пик (PHF) для трех стандартных направлений движения. Если коэффициент меньше 1.00, это свидетельствует о намерении пользователя моделировать пиковый промежуток внутри часового периода.

7 Емкость зоны поворота: поле ввода определяет емкость очереди ТС в направлениях левого и правого поворотов. Емкость очереди для конкретного сегмента при необходимости может быть задана в окне «Параметры очередей на перекрестке» (меню «Правка – Дополнительно – Очереди»). Если направлению на поворот соответствует полоса полной длины, протянувшаяся от предыдущего узла до текущего (подразумевается отсутствие зоны поворота как таковой), поле можно оставить пустым, и тогда емкость очереди автоматически приравняется длине сегмента.

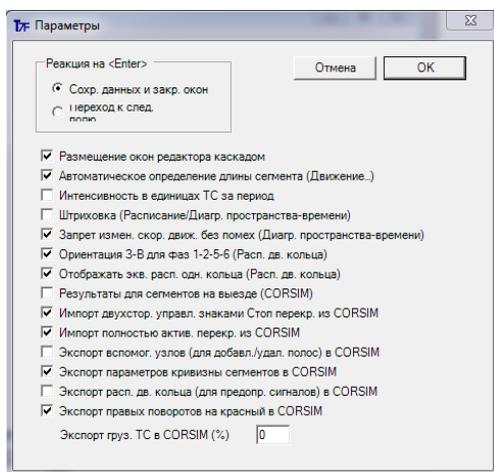


Рисунок Б.15 – Меню «Сервис – Параметры»

8 Добавить/Удалить: кнопка позволяет создавать и удалять полосы аналогично упомянутой выше опции контекстного меню диаграммы.

9 Номер узла: меню переключения между узлами перекрестка.

Нажав левой кнопкой мыши на полосе сегмента, можно автоматически обновить номер полосы. Щелчок правой кнопкой на полосе приводит к открытию контекстного меню с командами добавления и удаления полос на текущем подъезде.

Введем следующие параметры для восточного направления (вход А).

Начнем с создания полосы № 3 либо нажатием правой кнопки мыши на полосе № 2 и выбором команды «Добавить после» (рисунок Б.16) контекстного меню, либо с помощью кнопки «Добавить/Удалить».

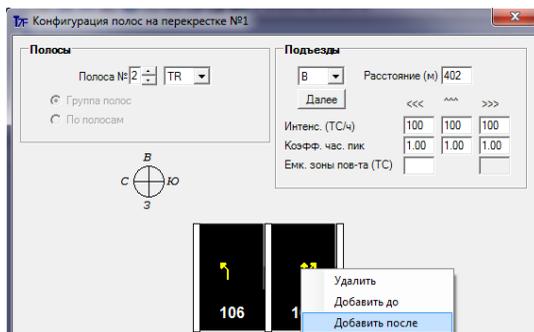


Рисунок Б.16 – Создание полосы № 3

Вернемся к полосе № 1 (левой кнопкой мыши нажав на полосе сегмента либо введем в поле «Полоса №» номер полосы), затем выберем в раскрывающемся списке опцию L («Налево») (рисунок Б.17).

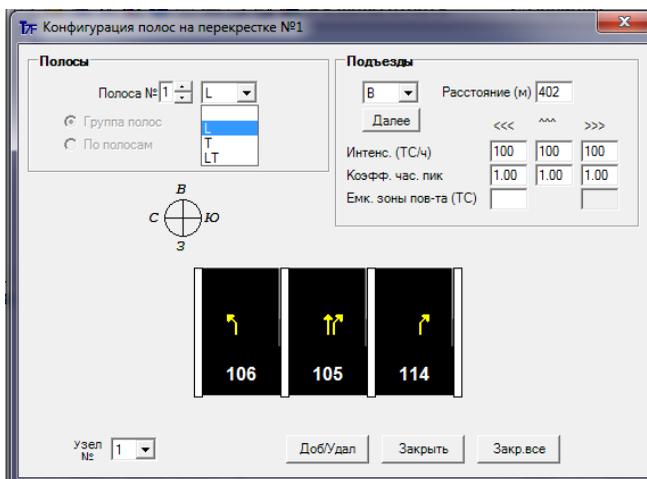


Рисунок Б.17 – Установка направления движения по полосе № 1

Перейдем к полосе № 2, выберем в раскрывающемся списке опцию Т («Прямо»). Перейдем к полосе № 3, выберем в раскрывающемся списке опцию TR («Прямо» и «Направо»). Результаты установки направлений движения по полосам показаны на рисунке Б.18.

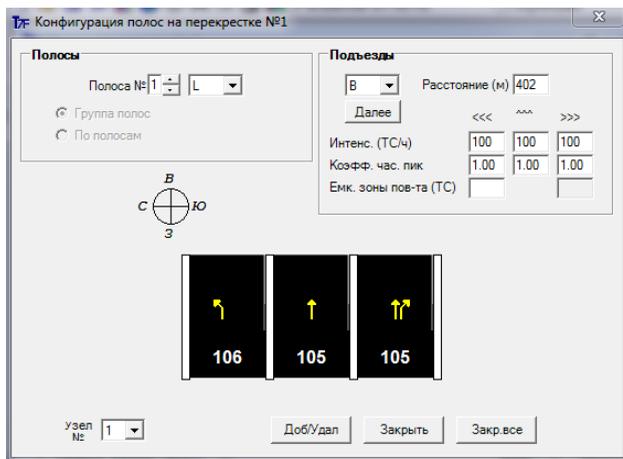


Рисунок Б.18 – Установка направления движения по полосам № 2 и 3

Перейдем на полосу № 2 и установим переключатель в положение «По полосам» (рисунок Б.18). Это обеспечивает использование дополнительного сегмента 113 для моделирования сложного подъезда. Установка переключателя в положение «По полосам» связана с неравномерным характером движения по полосам, способ моделирования по полосам становится необходимым для достижения достоверных результатов.

Поле ввода «Расстояние» задает расстояние на текущем подъезде к перекрестку от предыдущего перекрестка. Примем следующие значения: в северном направлении и в южном, сегменты подъезда кодируются как внешние, поэтому необходимость задавать расстояние нет, в восточном направлении от ближайшего регулируемого перекрестка расстояние составляет 1000 м, в западном направлении 580 м (рисунок Б.19).

Далее необходимо ввести данные об интенсивности ТП (ТС/ч) в соответствии с картограммой (см. рисунок А.6). Так как осуществляем анализ по полосам в условиях, когда несколько номеров сегментов используется для представления одного направления движения, в рассматриваемом поле ввода отображается значение, суммарное по всем сегментам этого направления. В такой ситуации оказывается важным применение окна «Движение» с целью кодирования точных значений интенсивности (включая поток насыщения) для каждой полосы. На рисунке А.20 показан ввод данных интенсивности по направлениям.

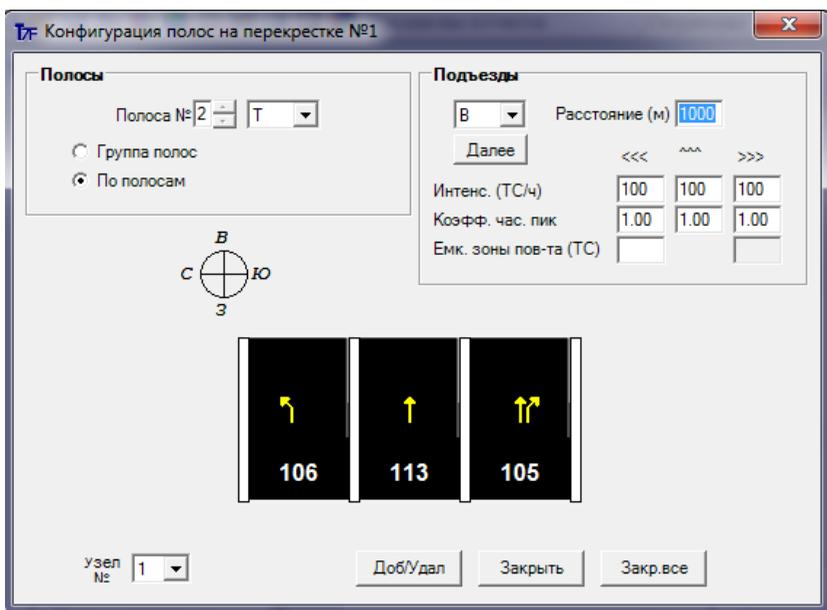


Рисунок Б.19 – Поле ввода «Расстояние»

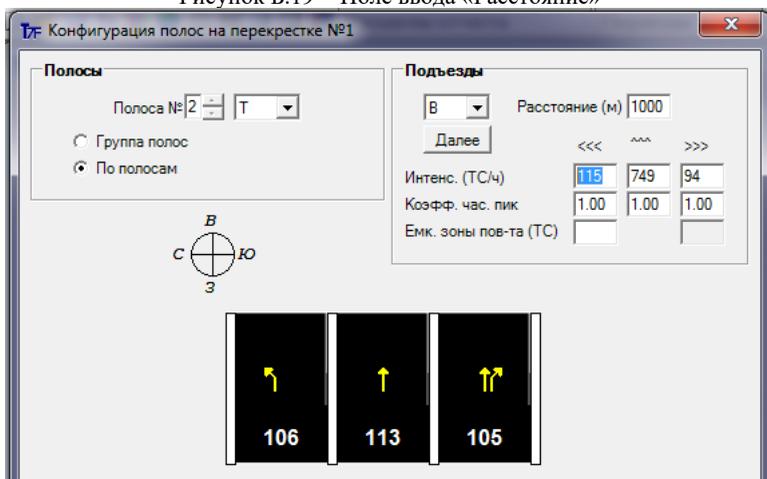


Рисунок Б.20 – Ввод данных об интенсивности

Коэффициент часа пик оставляем по умолчанию.

Введем емкость зоны поворота, которое составляет около 6 автомобилей, аналогично и для подъезда в западном направлении.

Результаты второго шага, связанного с созданием полос, представлены

на рисунках Б.21.

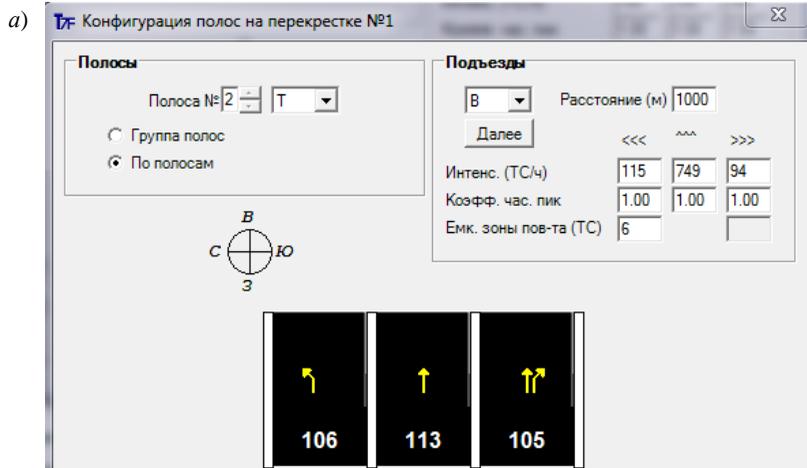
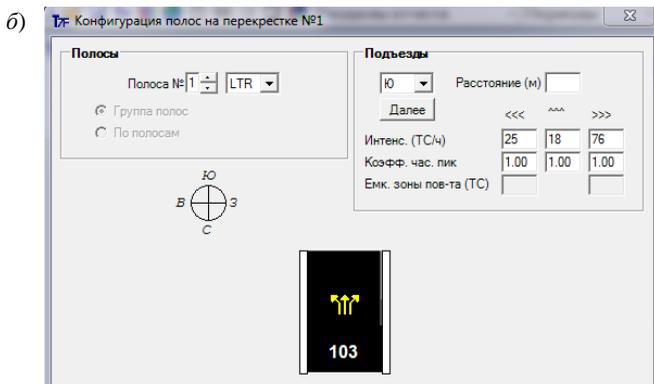


Рисунок Б.21 (начало) – Создание полос в разных направлениях  
а – восточное (вход А)



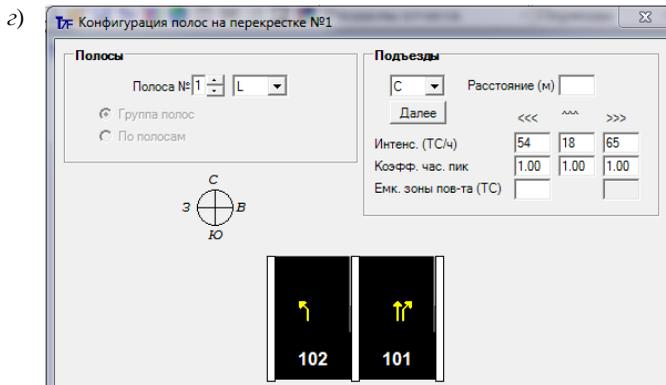
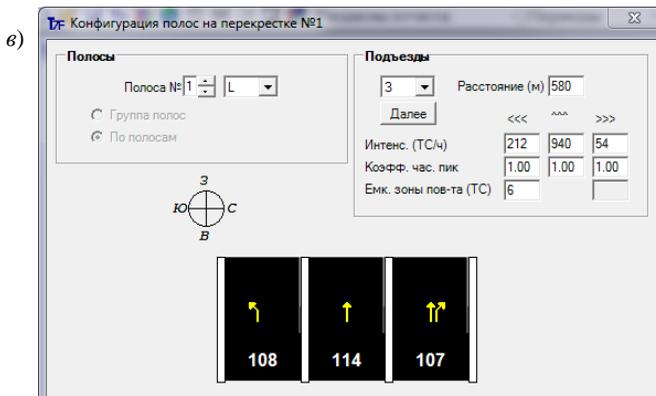


Рисунок Б.21 (окончание) – Создание полос в разных направлениях  
 $\bar{b}$  – южное (вход В);  $\bar{v}$  – западное (вход С);  $\bar{z}$  – северное (вход D);

Для общего представления обо всём перекрестке можно обратиться к соответствующим командам подменю «Правка – Перекресток» (рисунок Б.22), в этом окне также можно создавать и редактировать полосы.

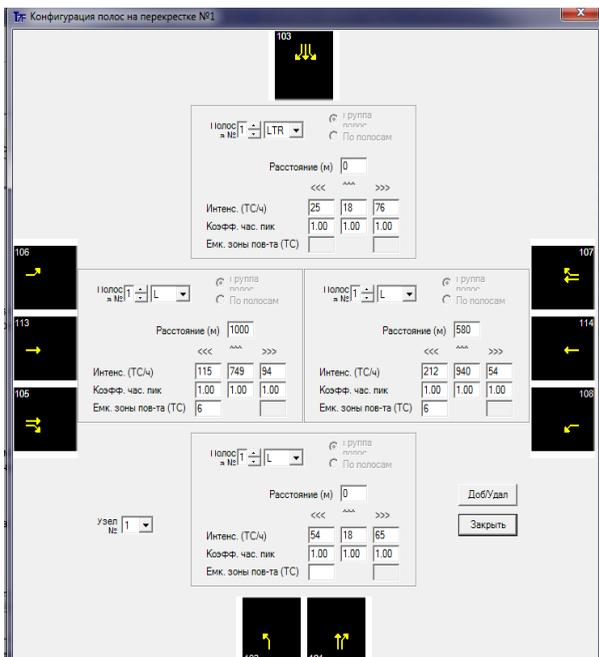


Рисунок Б.22 – Меню «Правка – Перекресток»

Четвертый шаг состоит в **использовании** окна «**Движение на перекрестке**» (меню «Правка – Движение») (рисунок Б.23) для просмотра редактирования интенсивности ТП и иных параметров движения (рисунок Б.24).

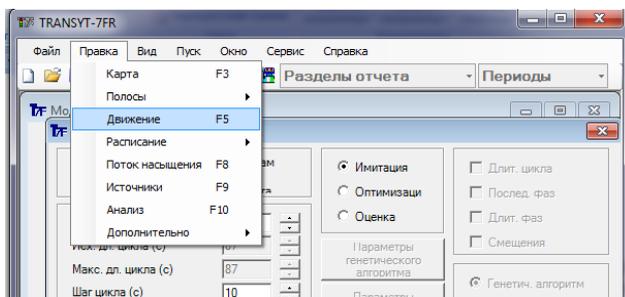


Рисунок Б.23 – Меню «Правка – Движение»

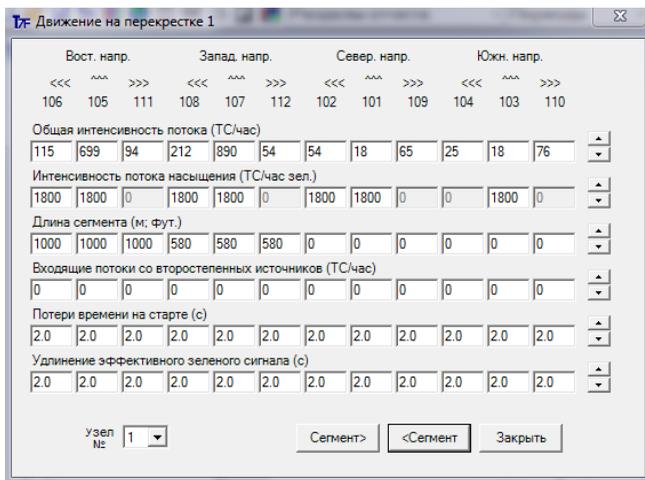


Рисунок Б.24 – Окно редактирования интенсивности ТП

### *Параметры окна.*

1 **Общая интенсивность потока:** указываются значения интенсивности движения ТС на каждом направлении сегмента. Величина задает общее количество ТС, включая другие типы (автобусы, грузовые и специальные) автомобилей. Заметим, что в программе требуется, чтобы интенсивность движения на любом направлении составляла не менее 10 ТС/ч. Поэтому при вводе значения интенсивности от 1 до 9 программа автоматически изменяет его на 10.

2 **Интенсивность потока насыщения:** здесь указывается откорректированная величина интенсивности поток насыщения применительно ко всему сегменту. Для корректировки величины потока насыщения необходимо обратиться в диалоговые окна «Поток насыщения» и «Калькулятор интенсивности потока насыщения».

3 **Входящие потоки от второстепенных источников:** крупные стояночные площадки, торговые центры, съезды со скоростных магистралей и другие подобные объекты трактуются как второстепенные источники трафика и моделируются в форме однородных входных потоков по отношению к сегменту-приемнику. Кодированное значение интенсивности однородного потока должно равняться сумме интенсивностей составляющих его потоков-источников. В качестве общего правила можно посоветовать моделировать второстепенный источник, если на его долю приходится не менее 10 % ТП, поступающего на сегмент-приемник, либо если этот источник поставляет более двух единиц ТС на протяжении одного цикла.

4 **Потери времени на старте:** по умолчанию поле содержит значение (уровня сети) потерь времени на старте, определяемое с помощью команды

меню «Правка – Дополнительно – Общие параметры». Если величина для конкретного сегмента заметно отличается от глобальной, тогда в наборе данных сохраняется соответствующее приращение или вычитаемое.

5 Удлинение эффективного зеленого сигнала: по умолчанию поле содержит значение удлинения эффективного зеленого сигнала, определяемое с помощью команды меню «Правка – Дополнительно – Общие параметры».

Для рассматриваемого перекрестка предполагается, что заданные значения длины сегмента в окне «Конфигурации полос» заданы, потерь времени на старте и удлинения эффективного зеленого сигнала в изменении не нуждаются. Однако, так как осуществляем анализ по полосам, в такой ситуации оказывается важным применение окна «Движение» с целью кодирования точных значений интенсивности (включая поток насыщения) для каждой полосы (сегменты с номерами 113, 105, 114, 107) значение интенсивности по полосам приведено на рисунке Б.24.

На рисунке Б.25, а показано изменение интенсивности движения для сегментов с номерами 105 и 107. Для доступа к сегментам с номерами от 113 и 114 потребуется воспользоваться кнопкой Сегмент (рисунок Б.25, б).



Рисунок Б.25 – Изменение интенсивности движения для сегментов:  
а – № 105 и 107; б – № 113 и 114

Пятый шаг – задание фазовых таблиц (рисунок Б.26).

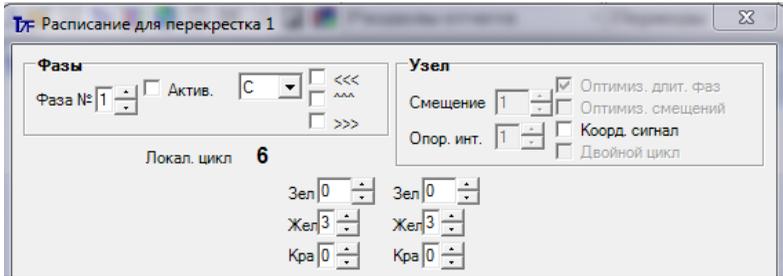
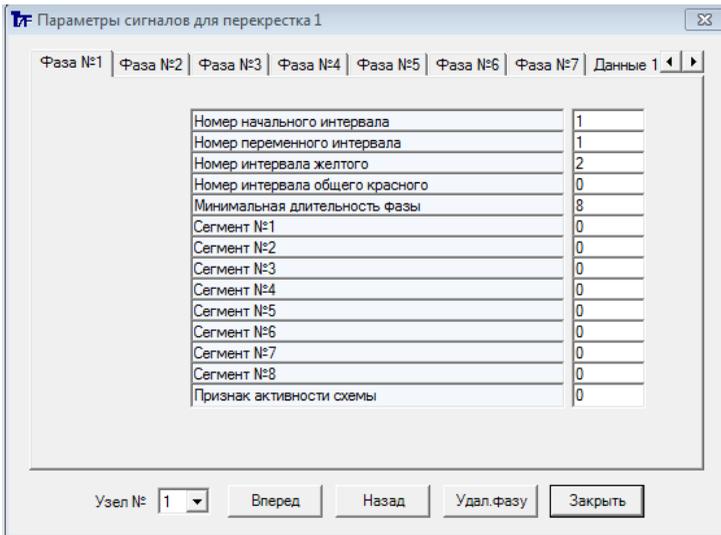


Рисунок Б.26 – Создание фазовых таблиц

Экран, вызываемый командой меню «Правка – Расписание», реализует возможности графического кодирования и просмотра расписаний управления сигналами и предлагает ряд полезных инструментов работы с диаграммами. Для ввода значений интервалов поля ввода чисел снабжены стрелками-счетчиками. Значительно облегчено задание длительностей фаз как сумм продолжительностей зеленого, желтого и общего красного интервалов.

Неграфический экран расписания (окно «Параметры сигналов для перекрестка») оказывается доступным после щелчка на кнопке «Кодир.» в нижней части рассматриваемого окна или выбора команды меню «Правка – Дополнительно – Расписание» (рисунок Б.27).



### Рисунок Б.27 – Параметры сигналов для перекрестка

Если расписание кодируется после выполнения анализа по полосам, инициированного в окне конфигурации полос, то дополнительные сегменты включаются в расписание автоматически. С другой стороны, для добавления сегментов с номерами 13 и выше в расписание (с целью анализа по полосам или моделирования перекрестков с четырьмя и более подъездами) можно обратиться к окну «Параметры сигналов для перекрестка», более функционально гибкому, нежели рассматриваемый экран «Расписание».

Рассмотрим подробнее параметры окна «Движение на перекрестке»:

1 Фаза №: содержимое поля свидетельствует о том, какая фаза подлежит редактированию.

2 Активная: флажок определяет, является ли фаза активной.

3 С / Ю / З / В: в списке выбирается подъезд (на север / юг / запад / восток), подлежащий редактированию. Далее пользователь может указать, какие из направлений активны.

4 <<< (влево) / ^^ (прямо) / >>> (вправо): флажки используются для указания активных направлений в период действия текущей фазы, а также для добавления фаз в расписание и удаления из него.

5 Координированный сигнал: устанавливается в случае, если узел является частью координированной сети.

6 Минимум: минимальное значение длительности фазы, ниже которого программа не опустится в процессе оптимизации параметров планов координации.

7 Номер узла: меню переключения между узлами перекрестка.

8 Диаграмма фаз: служит графическим представлением расписания. Неактивные фазы обозначаются синими стрелками, а активные – серыми. Привилегированным направлениям отвечают сплошные, а направлениям с разрешением – штриховые стрелки.

9 Линейная диаграмма: является наряду с диаграммой фаз одним из самых важных компонентов окна «Расписания». При просмотре слева направо диаграмма дает пространственно-временное представление расписания. По горизонтальной оси откладываются длительности цикла и интервалов. Ширина каждого интервала на диаграмме пропорциональна его длительности, хотя диаграмма в целом всегда заполняет ширину окна расписания. Линейная диаграмма согласуется с диаграммой фаз: начальные интервалы слева ассоциируются с первой фазой, а завершающие, расположенные справа, – с последней фазой.

Интервалы зеленого, желтого и общего красного сигналов обозначаются на линейной диаграмме зеленым, желтым и красным цветом соответственно. Кроме того, интервалы желтого и общего красного могут заполняться штриховкой (меню «Сервис – Параметры»). По умолчанию

используются только цветовые признаки, а штриховка дополняет их, облегчая восприятие: интервалы желтого штрихуются одиночными диагональными линиями, а общего красного – двойными.

10 Опорный интервал: изменение значения приводит к смещению начала работы цикла. Опорный интервал обозначается на линейной диаграмме вертикальной стрелкой и сокращением «Нач.». Стрелка указывает на позицию начала отсчета смещения или точки остановки внутри цикла. Принято считать, что оба параметра отсчитываются от начала опорного интервала, и поэтому стрелка будет указывать на его левую границу. Когда речь идет о некоординированных операциях, ни опорный интервал, ни смещение не оказывают влияния на результат моделирования.

11 Добавить/Удалить: щелчок на кнопке позволяет добавить или удалить любую фазу для активного перекрестка. Те же операции доступны из контекстного меню, вызываемого в диаграмме фаз.

12 Экспорт: кнопка дает возможность экспорта данных, включающих длину цикла, смещения и длительности фаз для соответствующего узла, во входной файл CORSIM (\*.trf).

Начнем с редактирования фазы № 1. Введем следующие параметры:

В списке С / Ю / З / В выбираем подъезд на запад, подлежащий редактированию. Далее указываем активные направления: прямо, направо и налево в продолжение текущей фазы для данного подъезда. Затем в списке С / Ю / З / В выбираем подъезд на восток и указываем, какие из направлений активны: прямо, направо и налево для данного подъезда. Аналогично редактируется фаза № 2 (рисунок Б.28).

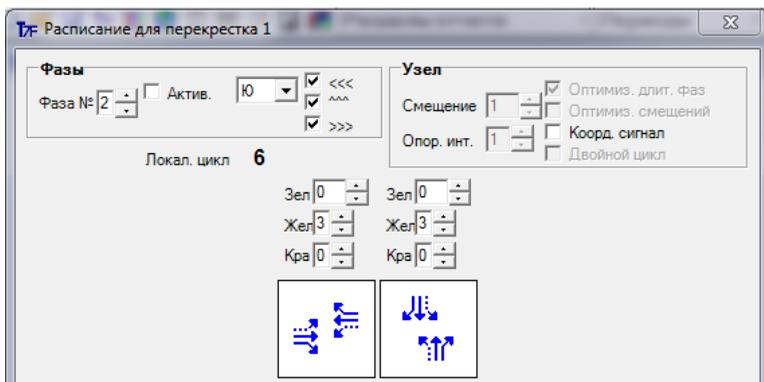


Рисунок Б.28 – Редактирование фазы № 1

Установим продолжительность зеленого, желтого и общего красного сигналов в соответствии с диаграммой, представленной на рисунке Б.28. В фазе № 1 продолжительность горения зеленого сигнала составляет 50 с,

а в фазе № 2 – 25 с. Продолжительность желтого и общего красного – по 3 с.

В нашем случае минимальная длительность фазы дополнительно увеличена для обеспечения безопасности пешеходов. Продолжительность зеленого сигнала для пешеходов, с, определяется по формуле

$$t_z = 0,75 B + 5.$$

где  $B$  – ширина проезжей части, пересекаемой пешеходами в  $i$ -й фазе, м.

Определим продолжительность разрешающего сигнала светофора для пешеходов, с:

I фаза –

$$t_{z1} = 0,75 \cdot 12 + 5 = 14;$$

II фаза –

$$t_{z2} = 0,75 \cdot 21 + 5 = 21.$$

Таким образом, минимальная длительность первой фазы составляет 20 с, второй – 27 с при условии, что переходной интервал в существующем цикле составляет 6 с.

Отметим, что при установке флажка «Исходное расписание» в окне «Параметры расчета», вызываемом с помощью команды меню «Правка – Анализ», игнорируется любая длительность зеленого сигнала, заданная пользователем, и программа самостоятельно определяет значения продолжительности зеленого сигнала для целей анализа (рисунок Б.29).

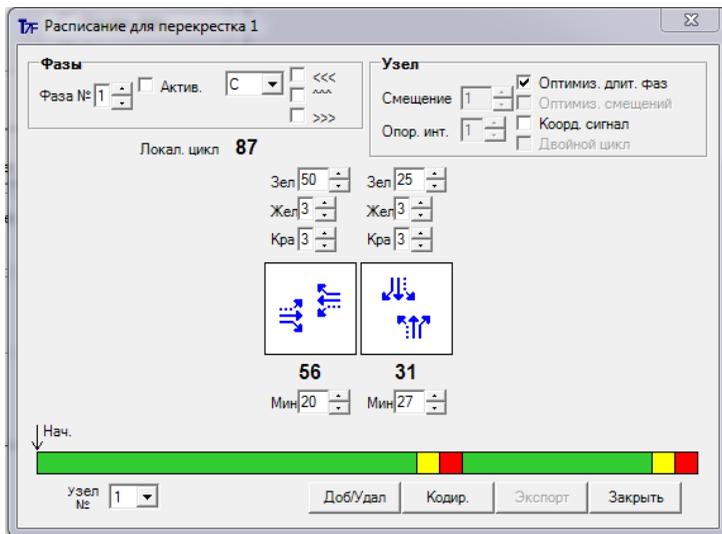


Рисунок Б.29 – Установка продолжительности сигналов

Для облегчения восприятия линейной диаграммы поставим флажок в меню «Сервис – Параметры» (рисунок Б.30).

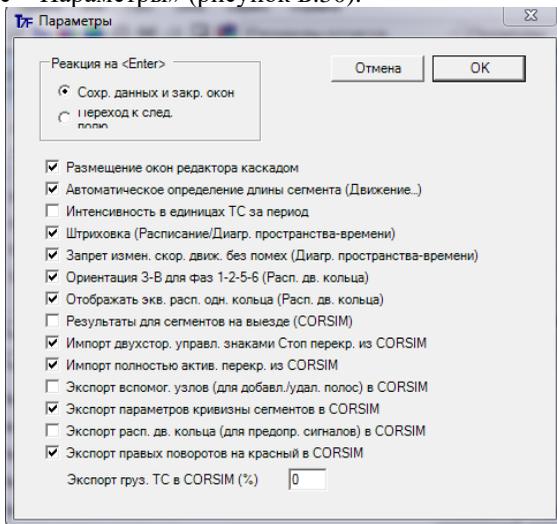


Рисунок Б.30 – Меню «Сервис – Параметры»

Полностью заполненное окно «Расписание для перекрестка» представлено на рисунке Б.31.

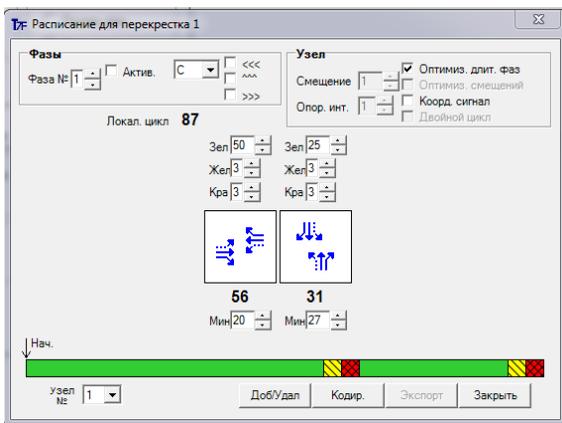


Рисунок Б.31 – Окно «Расписание для перекрестка»

### Шестой шаг – расчет потока насыщения.

Экран предназначен в помощь пользователю при корректировке значений интенсивности потока насыщения. Если скорректированные значения интенсивности потоков насыщения уже известны, можно ввести

их непосредственно на экране «Движение» и к окну калькулятора не обращаться вовсе.

Экран калькулятора потока насыщения, открываемый командой меню «Правка – Дополнительно – Пропускная способность». Окно «Калькулятор интенсивности потока насыщения» представлено на рисунке Б.32.

Рисунок Б.32 – Расчет потока насыщения

В верхней части окна «Калькулятор интенсивности потока насыщения» скорректированная интенсивность потока насыщения представляет собой произведение базового потока насыщения, количества полос и одиннадцати коэффициентов корректировки.

Для расчета значения потока насыщения для каждого сегмента модели необходимо ввести следующие параметры.

1 Базисный свободный поток: указывается базисный поток насыщения (без учета влияющих факторов).

2 Количество полос: указывается количество полос сегмента.

3 Ширина полосы: указывается средняя ширина полосы.

4 Грузовой транспорт: указывается доля грузового транспорта на выбранном направлении сегмента в процентах от общего ТП.

5 Уклон: указывается угол наклона выбранного направления сегмента.

6 Количество парковок: указывается количество автомобилей, выезжающих со стоянок. В случае если на выбранном направлении сегмента отсутствует стоянка, ставится галочка в поле «Стоянка запрещена».

7 Количество останавливающихся автобусов: указывается количество остановок на протяжении выбранного направления сегмента.

8 Тип описываемой зоны: выбирается тип зоны, в которой находится описываемое направление движения сегмента (0,9 – для центральных районов, 1 – для остальных участков сети).

9 Использование полос: указывается характер распределения ТС на направлении сегмента. Раскрывающийся список допускает выбор одной из следующих опций: «Равномерное», «Слегка неравномерное», «Средне неравномерное» или «Сильно неравномерное». Им отвечают значения коэффициента корректировки 1.00, 0.95, 0.90 и 0.85. Если в поле «Количество полос» задано значение «1», список «Использование полос» блокируется и коэффициент корректировки степени использования полос предполагается равным единице. При количестве полос более одной по умолчанию предлагается опция «Слегка неравномерное» (коэффициент 0,95).

10 Направление движения: указывается тип движения с сегмента.

11 Влияние пешеходов или велосипедистов налево: указывается степень влияния пешеходов или велосипедистов при повороте ТС налево.

12 Влияние пешеходов или велосипедистов направо: указывается степень влияния пешеходов или велосипедистов при повороте ТС направо.

В раскрывающемся списке «Влияние пешеходов или велосипедистов налево или направо» допускается выбор одной из следующих опций: «Отсутствует», «Незначительно», «Среднее» или «Значительное». Им отвечают значения коэффициента корректировки 1.00, 0.95, 0.90 и 0.85.

13 = : отражается рассчитанный поток насыщения.

14 Сохраненное значение: отражается сохраненное значение потока насыщения для выбранного направления сегмента.

15 Интервал движения: средний временной интервал следования ТС по любой заданной полосе, зависит от сохраненного значения.

16 Номер сегмента: меню переключения между направлениями сегмента. Переключаясь между сегментами, необходимо определить поток насыщения для каждого сегмента модели.

17 Номер узла: меню переключения между узлами перекрестка.

Для вступления в силу внесенных пользователем изменений необходимо нажать «Применить».

Синяя стрелка в поле над кнопкой «Применить» указывает направление поворота для активного сегмента.

В раскрывающемся списке «Сегмент №» представлены номера только главных привилегированных сегментов.

Число ТС по видам для каждого сегмента представлено в таблице Б.5.

Долю грузовых ТС для каждого сегмента определим по формуле

$$\Delta i = \frac{n_i}{\sum n_i},$$

где  $n_i$  – число ТС данного типа.

Уровни интенсивности насыщенного ТП для сегментов № 106 и 108 с разрешением движения и второстепенных общих сегментов № 109–112 в кодировании не нуждаются.

Таблица Б.5 – Число ТС по видам для каждого сегмента

| № сегмента | Направление | Число ТС по видам |
|------------|-------------|-------------------|
| 106        | Налево      | 27Л, 1Г           |
| 113        | Прямо       | 127Л, 1Г          |
| 105        | Прямо       | 41Л, 2Г, 10О      |
| 111        | Направо     | 23Л               |
| 104        | Налево      | 18Л               |
| 103        | Прямо       | 4Л                |
| 110        | Направо     | 6Л                |
| 108        | Налево      | 50Л, 1Г           |
| 114        | Прямо       | 135Л              |
| 107        | Прямо       | 80Л, 3Г, 9О       |
| 112        | Направо     | 13Л               |
| 102        | Налево      | 13Л               |
| 101        | Прямо       | 4Л                |
| 109        | Направо     | 16Л               |

Экран «Калькулятор интенсивности потока насыщения», рассчитанный для сегмента номер 101, представлен на рисунке Б.33.

Рисунок Б.33 – Калькулятор интенсивности потока насыщения

Для всех сегментов № 101, 103, 105, 107, 113, 114 необходимые для расчета потока насыщения сведем в таблицу Б.6.

Выполним аналогичные процедуры расчета потока насыщения для остальных сегментов, воспользовавшись окном «Движение на перекрестке» (меню «Правка – Движение») для просмотра результата корректировки величины потоков насыщения (рисунки Б.34, Б.35). Отметим, что сегменты в северном и южном направлениях закодированы как внешние сегменты, поэтому в окне «Движение на перекрестке» значение длин сегментов используются по умолчанию.

Движение на перекрестке 1

| Вост. напр.                                  |      |      | Запад. напр. |      |     | Север. напр. |      |     | Южн. напр. |      |     |
|--|------|------|--------------|------|-----|--------------|------|-----|------------|------|-----|
| <<<  | ^^^  | >>>  | <<<          | ^^^  | >>> | <<<          | ^^^  | >>> | <<<        | ^^^  | >>> |
| 106  | 105  | 111  | 108          | 107  | 112 | 102          | 101  | 109 | 104        | 103  | 110 |
| Общая интенсивность потока (ТС/час)          |      |      |              |      |     |              |      |     |            |      |     |
| 115  | 219  | 94   | 212          | 381  | 54  | 54           | 18   | 65  | 25         | 18   | 76  |
| Интенсивность потока насыщения (ТС/час зел.) |      |      |              |      |     |              |      |     |            |      |     |
| 0  | 1643 | 0    | 0            | 1643 | 0   | 0            | 1778 | 0   | 0          | 1787 | 0   |
| Длина сегмента (м; фут.)                     |      |      |              |      |     |              |      |     |            |      |     |
| 1000   | 1000 | 1000 | 580          | 580  | 580 | 0            | 0    | 0   | 0          | 0    | 0   |

Рисунок Б.34 – Откорректированные величины потока насыщения для сегментов № 106–110

| сегмент сегмент                              |     |     | сегмент сегмент |     |     | сегмент сегмент |      |     | сегмент сегмент |     |     |
|--|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|------|-----|-----------------|-----|-----|
| 118  | 117 | 123 | 120             | 119 | 124 | 114             | 113  | 121 | 116             | 115 | 122 |
| Общая интенсивность потока (ТС/час)          |     |     |                 |     |     |                 |      |     |                 |     |     |
| 0  | 0   | 0   | 0               | 0   | 0   | 559             | 530  | 0   | 0               | 0   | 0   |
| Интенсивность потока насыщения (ТС/час зел.) |     |     |                 |     |     |                 |      |     |                 |     |     |
| 0  | 0   | 0   | 0               | 0   | 0   | 1782            | 1764 | 0   | 0               | 0   | 0   |
| Длина сегмента (м; фут.)                     |     |     |                 |     |     |                 |      |     |                 |     |     |
| 0  | 0   | 0   | 0               | 0   | 0   | 580             | 1000 | 0   | 0               | 0   | 0   |

Рисунок Б.35 – Откорректированные величины потока насыщения для сегментов № 118–122

Таблица Б.6 – Параметры сегментов для расчета потока насыщения

| Номер сегмента                               | 101                | 103     | 105         | 107         | 113          | 114       |
|--|--------------------|---------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| Базисный поток насыщения, ТС/ч               | 1800               |         |             |             |              |           |
| Количество полос                             | 1                  | 1       | 1           | 1           | 1            | 1         |
| Ширина полосы, м                             | 4                  | 4,5     | 3,5         | 3,5         | 3,5          | 3,5       |
| Грузовой транспорт                           | 0/4 = 0            | 0/4 = 0 | 2/53 = 0,03 | 3/92 = 0,03 | 1/128 = 0,01 | 0/135 = 0 |
| Уклон  | 0                  | 0       | 0           | 0           | 0            | 0         |
| Количество парковок                          | Стоянка запрещена  |         |             |             |              |           |
| Количество остановок автобусов               | 0                  | 0       | 0           | 0           | 0            | 0         |
| Тип зоны                                     | Другой             |         |             |             |              |           |
| Использование полос                          | Список блокируется |         |             |             |              |           |
| Направление движения                         | Прямо              |         |             |             |              |           |
| Влияние пешеходов или велосипедистов налево  | Отсутствует        | Слабое  | Отсутствует |             |              |           |
| Влияние пешеходов или велосипедистов направо | Слабое             |         |             |             | Отсутствует  |           |
| Поток насыщения, ТС/ч                        | 1778               | 1787    | 1643        | 1643        | 1764         | 1782      |

### Седьмой шаг – параметры расчета.

Окно «Параметры расчета» открывается после нажатия клавиши «Ок» в окне «Создание входного файла Transyt» или вызывается через меню «Правка – Анализ» (рисунок Б.36, 37).

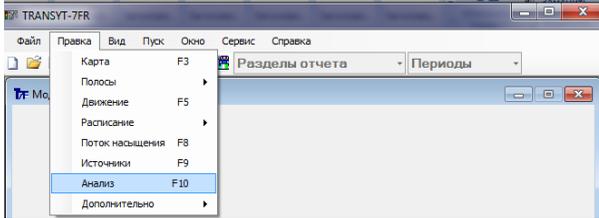


Рисунок Б.36 – Меню «Правка – Анализ»

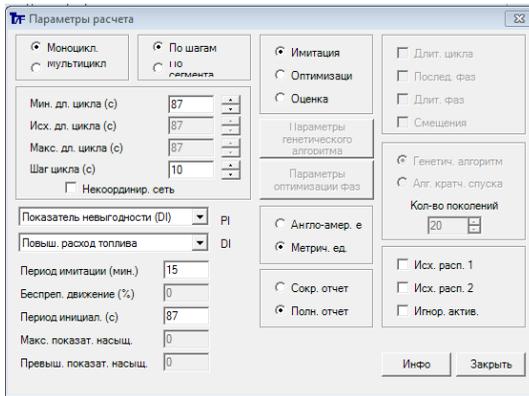


Рисунок Б.37 – Окно «Параметры расчета»

Рассмотрим содержательную составляющую окна «Параметры расчета»:

1 Моноциклическая или мультициклическая имитация: переключатель определяет режим имитации. Имитация представляет собой аналитический процесс, цель которого состоит в достоверном представлении событий реального мира (в данном случае – ТП в сети, управляемых сигналами светофоров на перекрестках).

Мультициклическая имитация применяется, чтобы гарантировать охват полного временного периода посредством последовательности циклов определенной длительности. В условиях стабильности и отсутствия явлений перенасыщения результаты моно- и мультициклической имитации могут почти совпадать.

Моноциклическую имитацию можно проводить как в пошаговом режиме, так и по сегментам. Мультициклическая имитация допускает только пошаговый вариант, поэтому при установке переключателя в

положение «Мультицикл.» опция «По сегментам» автоматически блокируется. При выборе режима мультициклической имитации количество циклов определяется на основе значения, задаваемого в поле «Период имитации».

2 Имитация по шагам или сегментам: переключатель определяет выбор методики имитации Transyt. В режиме имитации по сегментам каждый сегмент моделируется отдельно и переход к следующему сегменту осуществляется по окончании имитации предыдущего. В режиме пошаговой имитации каждый сегмент сети имитируется в течение одного шага (или отрезка времени в секундах) и затем выполняется переход к следующему шагу.

В общем случае пошаговый режим позволяет более реалистично моделировать ситуацию блокировки очередей, динамику удлинения очереди и время пробега внутри сегмента, в то время как имитация по сегментам требует меньшего времени вычислений.

3 Имитация / Оптимизация / Оценка: переключатель позволяет определить характер предстоящих манипуляций с текущим расписанием: моделирование или оптимизация. Опция оценки активных схем также доступна, но она не сочетается с мультициклической имитацией и анализом по многим периодам.

При выборе режима имитации исходное расписание, заданное посредством команды меню «Правка – Расписание», оценивается в единственном сеансе имитации (исключение составляет случай, когда установлен флажок «Исх. расписание»). В режиме имитации максимальные и минимальные значения длины цикла принимаются равными.

Оптимизация в Transyt-7FR осуществляется итеративно на основе сеансов имитации. Результат сеанса с наивысшим значением показателя эффективности сохраняется, и соответствующее расписание в итоге рекомендуется программой как оптимальное.

4 Длительность цикла / Последовательность фаз / Длительности фаз / Смещения: группа флажков представляет параметры расписания, которые могут быть объектами оптимизации. Если для оптимизации применяется генетический алгоритм, программа может оптимизировать любые из этих параметров отдельно либо в произвольном сочетании. Процесс оптимизации часто демонстрирует большую эффективность, если один или несколько параметров принимаются постоянными. При использовании метода кратчайшего спуска оптимизировать последовательность фаз не удастся.

Для изолированных и некоординированных перекрестков смещения не применяются и в данном случае оптимизации не подлежат. Оптимизация последовательности фаз для координированных перекрестков эффективна, большей частью, с точки зрения улучшения возможностей беспрепятственного движения. С другой стороны, оптимизация длины

цикла и длительностей фаз может принести выгоды для любых перекрестков, изолированных и координированных.

5 Минимальная длительность цикла: поле предназначено для задания значения системной длины цикла для использования в процессе имитации или при проведении оптимизации, ограниченной пределами одного цикла.

6 Исходная длительность цикла: значение используется в процессе оптимизации длины цикла по генетическому алгоритму. Если режим оптимизации длительности цикла не выбран либо генетический алгоритм не затребован, значение игнорируется.

При использовании генетического алгоритма величина исходной длительности цикла влияет на выбор первого варианта первого поколения. Первый вариант инициирует процесс оптимизации и используется для формирования начальных выходных данных. За первый вариант первого поколения принимается исходное расписание, заданное пользователем.

7 Максимальная длительность цикла: значение используется только в сеансах оптимизации длительности цикла. То есть когда пользователь хочет ограничить процесс анализа или оптимизации получением единственного значения длительности цикла, при этом максимальная и минимальная границы длительности цикла принимаются равными.

8 Некоординированная сеть: если флажок не установлен, все регулируемые перекрестки в сети трактуются как координированные. При установке флажка «Некоординированная сеть» все регулируемые перекрестки в сети рассматриваются как некоординированные. Для имитации одних перекрестков как координированных, а других как некоординированных предпочтительно выбрать режим координированных операций (убрать выделение флажком «Некоординированная сеть»), а затем обозначить требуемые отдельные перекрестки как некоординированные, удалив выделение флажком «Коорд. сигнал» в окне расписания (команду меню «Правка – Расписание») для каждого из них.

9 Шаг цикла: если минимальная и максимальная длительности цикла определяют границы диапазона оцениваемых значений, то в поле шага вводится интервал между значениями. Шаг, измеряемый в секундах, должен уместиться в диапазон целое число раз, иначе максимальное значение длины цикла в процессе оптимизации не будет востребовано.

10 Параметры генетического алгоритма и оптимизации фаз: в средней части экрана «Параметры расчета» расположены кнопки «Параметры генетического алгоритма» и «Параметры оптимизации фаз» (применяется для оптимизации последовательности фаз), обеспечивающие доступ к соответствующим вспомогательным окнам настройки.

11 Генетический алгоритм / Алгоритм кратчайшего спуска: переключатель позволяет осуществить выбор между двумя возможными алгоритмами оптимизации.

Алгоритм кратчайшего спуска – это итерационный алгоритм градиентного поиска, требующий выполнения многочисленных сеансов имитации.

Генетический алгоритм обладает возможностью избегать «ловушек» локальных оптимальных решений и наделен лучшим математическим аппаратом для отыскания глобального оптимума.

Оптимизация длительности цикла с помощью алгоритма кратчайшего спуска предусматривает выполнение серии сеансов оптимизации длительности или смещений фаз с ограничением продолжительности единственного цикла в установленных пределах. Например, для длительности цикла в диапазоне 60–100 с шагом поиска 10 с следовало бы выполнить пять сеансов оптимизации посредством алгоритма кратчайшего спуска. При использовании в тех же условиях генетического алгоритма требуется только один сеанс, в ходе которого проводятся эксперименты с различными длительностями циклов.

Для определения абсолютных или глобальных оптимальных решений более предпочтительным с математической точки зрения выглядит генетический алгоритм, нежели метод кратчайшего спуска. С другой стороны, генетический алгоритм требует относительно большего компьютерного времени.

12 Количество поколений: при выборе опции генетического алгоритма поле определяет максимум поколений (итераций процесса оптимизации). В общем случае большее значение способствует большей эффективности процесса, однако требует дополнительных затрат времени вычислений.

13 Показатель эффективности: показатель эффективности (PI) (в математике принят аналогичный по смыслу термин «целевая функция») позволяет пользователю формализовать свои предпочтения в отношении эффективности функционирования дорожно-транспортной системы. Проще говоря, Transyt-7FR формирует расписание, которое способствует достижению оптимального значения PI. Transyt-7FR предлагает целый набор вариантов показателя эффективности, отражающих требования пользователя в отношении задержек, остановок, организации беспрепятственного движения (PROS), расхода топлива, образования очередей и пропускной способности сегментов сети. Доступные опции представлены на рисунке Б.38.

В общем случае программа максимизирует PI – за исключением случая, когда выбран показатель невыгодности (DI). Поскольку DI представляет собой комплексный показатель, учитывающий неблагоприятные факторы (остановки, задержки и расход топлива), он подлежит минимизации.

Показатель беспрепятственного движения (PROS) – это количественный критерий, характеризующий способность транспорта следовать через несколько перекрестков подряд без остановок.

Можно также выбрать вариант совместного использования показателей PROS и DI для достижения компромиссного решения. Например, если PI определен как PROS/DI, программа будет одновременно максимизировать числитель (PROS) и минимизировать знаменатель (DI).

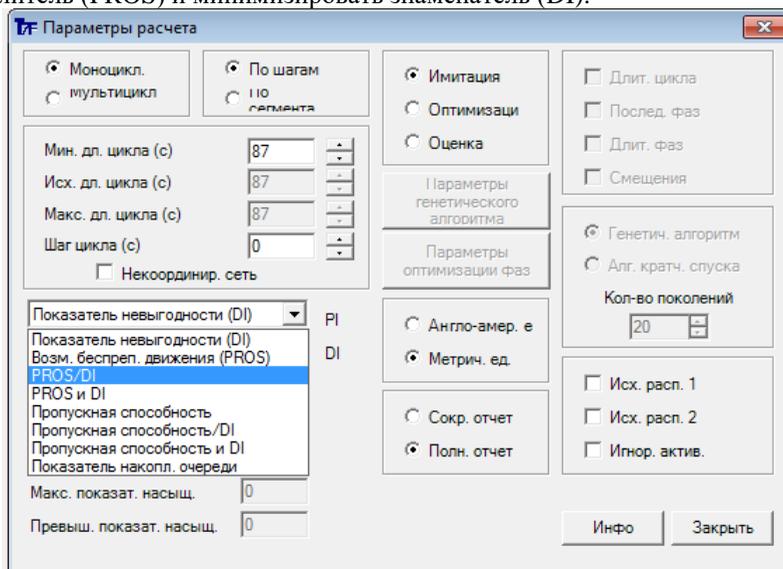


Рисунок Б.38 – Доступные опции показателя эффективности

Отметим, что другие сочетания критериев – «PROS и DI» и «Пропускная способность и DI» – предусмотрены для использования при оптимизации по методу кратчайшего спуска. Поэтому их не стоит применять при выборе генетического алгоритма. В этом случае программа максимизирует первый показатель и минимизирует второй.

14 Показатель невыгодности: в раскрывающемся списке выбирается требуемый вариант показателя невыгодности (рисунок Б.42). Этот параметр служит критерием невыгодности (неэффективности) производимых операций по управлению движением и отражает такие отрицательные показатели, как остановки, задержки, непроизводительный расход топлива и т. д. Критерий минимизации расхода топлива следует считать предпочтительным для сокращения задержек и увеличения пропускной способности.

15 Период имитации: имеется в виду период времени (в минутах), в течение которого условия движения транспорта в сети считаются неизменными.

16 Период инициализации: период инициализации процедуры моделирования используется для подготовки характеристик ТП,

определения профилей потока и длины очередей. По умолчанию продолжительность периода инициализации принимается равной длине фонового системного цикла, даже если задается как нуль. Для большинства практических приложений рекомендуется оставлять значение, предлагаемое по умолчанию, или устанавливать его равным длительности системного цикла. Поле оказывается доступным только при выборе режима имитации.

17 Максимальный показатель насыщения: при выборе в качестве показателя эффективности опции «Пропускная способность» в рассматриваемом поле задается максимальное отношение интенсивности к пропускной способности, которое, будучи превышенным на любом сегменте, пересчитывает PI на величину повышающего коэффициента.

18 Превышение показателя насыщения: при выборе в качестве показателя эффективности опции «Пропускная способность» в рассматриваемом поле задается штрафной коэффициент, который применяется к PI при превышении максимального показателя насыщения.

19 Англо-американские / метрические единицы: переключатель определяет выбор между англо-американской и метрической системами измерения таких значений, например, скорость (миль/ч или км/ч), расстояние (фут или м), расход топлива (гал. или л) и пр.

20 Сокращенный / полный отчет: переключатель определяет формат выходного отчета или файла. Сокращенный (узкий) формат включает 80 колонок текста и удобен для вывода на печать, а полный (широкий) состоит из 132 колонок и содержит полезную дополнительную информацию. Это относится также и к выходному файлу, генерируемому процедурой макроскопической имитации.

21 Исходное расписание: при установке флажка «Исх. расписание» игнорируется любая длительность зеленого сигнала, заданная пользователем, и программа самостоятельно определяет собственные значения продолжительности зеленого сигнала для целей анализа.

Если не установлен ни один из флажков «Исх. расписание», это значит, что пользователь собирается самостоятельно вводить значения смещений (или точек остановки), а также длительности всех фиксированных и переменных интервалов в окне расписания. Наличие флажка «Исх. расписание 1» свидетельствует, что пользователь вводит значения длительности всех фиксированных интервалов, пользуясь экраном расписания, а длительности интервалов переменного зеленого генерируются программой в соответствии с результатами моделирования.

Заметим, что «переменные» интервалы – это интервалы зеленого, которые могут быть оптимизированы, в то время как «фиксированные» интервалы оптимизации не подлежат. К фиксированным относятся интервалы желтого и общего красного.

Флажок «Исх. расписание 2» подобен флажку «Исх. расписание 1» за одним исключением: заданные пользователем смещения и точки остановки сохраняются.

22 Игнорирование признаков активности схемы управления: длительности фаз и задержки должны вычисляться исходя из предположения об использовании определенной схемы управления.

23 Информация о проекте: кнопка вызывает диалоговое окно, в котором можно ввести дополнительную информацию о проекте для включения ее в TIN-файл и выходные отчеты (рисунок Б.39).

|           |                    |                 |            |
|-----------|--------------------|-----------------|------------|
| Исполнит. | Канек Юлия         | Дата завершения | 17.02.2015 |
| Предпр.   | БелГУТ             | Период анализа  |            |
| Юридич.   |                    |                 |            |
| Название  | Модель перекрестка |                 |            |

Рисунок Б.39 – Окно информации о проекте

Для проверки правильности создания модели произведем имитацию существующих условий, для того чтобы убедиться, что программа верно отображает реальную ситуацию. Так как на исследуемом перекрестке рассматриваем определенную схему управления, то ставим переключатель на моноциклическую имитацию. Метод имитации выбираем по шагам, так как в общем случае пошаговый режим позволяет более реалистично моделировать ситуацию. В режиме имитации максимальное и минимальное значения длины цикла принимаются равными. Период имитации: 15 мин, оставляем по умолчанию, поскольку в течение такого промежутка времени дорожно-транспортные условия можно считать постоянными. Период инициализации: оставляем по умолчанию 87 с (как рекомендуется) либо равным длительности цикла. Окно «Параметры расчета» представлено на рисунке Б.40.

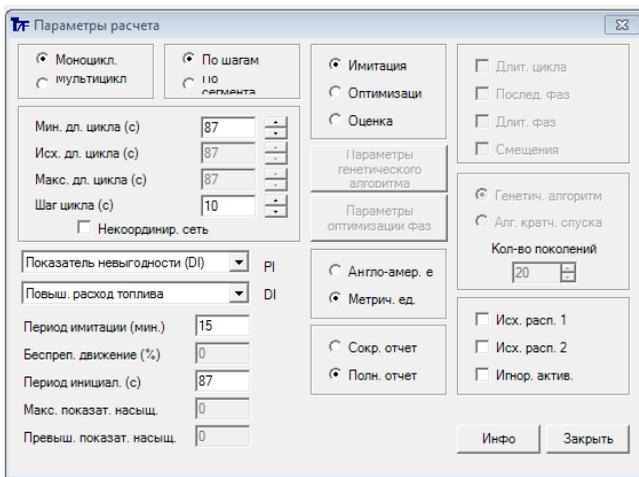


Рисунок Б.40 – Параметры процесса моделирования

Запустим моделирование, нажав на значок  либо меню «Пуск – Запустить Transyt 7FR». Если ошибок не выявлено, то на экране появится отчет о текущих транспортных данных (рисунок Б.41). Следует отметить, что итоговые результаты для общих полос приводятся только применительно к основным сегментам (прямого направления).

| Модель перекрестка.tif                    |              |                              |                              |                       |                              |                                  |                         |                     |                          |                         |               |                 |                 |              |
|---|--------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Процедура о начальных установочных данных |              |                              |                              |                       |                              |                                  |                         |                     |                          |                         |               |                 |                 |              |
| Движение/<br># узла                       | Полок<br>а/ч | Ил-ль<br>а/ч                 | Сред.<br>%                   | Полн.<br>нас.<br>а-км | Пробег<br>а-ч                | Время<br>Полн.<br>Сред.<br>сек/а | проб.<br>Сред.<br>сек/а | Станд.<br>Случ.     | Задержка<br>Случ.<br>а-ч | Полн.<br>Полн.<br>сек/а | Станд.        | Остановки       |                 |              |
|   |              |                              |                              |                       |                              |                                  |                         |                     |                          |                         |               | Случ.<br>а/ч, % | Полн.<br>а/ч, % |              |
| СН Прям                                   | 83           | 1778P                        | 18                           | 0.00                  | 0.56                         | 24.3                             | 0.54                    | 0.02                | 0.56                     | 24.3                    | 59.7 ( 72%)   | 4.2 ( 6%)       | 63.9 ( 78%)     |              |
| СН Лев                                    | 54           | 0                            | 16                           | 0.00                  | 0.36                         | 23.9                             | 0.34                    | 0.02                | 0.36                     | 23.9                    | 39.5 ( 73%)   | 3.6 ( 7%)       | 43.1 ( 80%)     |              |
| КН Прям                                   | 119          | 1787P                        | 30                           | 0.00                  | 0.70                         | 21.0                             | 0.63                    | 0.06                | 0.70                     | 21.0                    | 78.6 ( 66%)   | 7.9 ( 7%)       | 86.4 ( 73%)     |              |
| ВН Прям                                   | 313          | 1643P                        | 35                           | 313.00                | 6.16                         | 70.9                             | 0.86                    | 0.09                | 0.95                     | 10.9                    | 153.4 ( 49%)  | 9.9 ( 4%)       | 163.2 ( 53%)    |              |
| ВН Лев                                    | 115          | 0                            | 26                           | 115.00                | 2.37                         | 74.2                             | 0.41                    | 0.05                | 0.45                     | 14.2                    | 66.9 ( 58%)   | 6.6 ( 6%)       | 73.5 ( 64%)     |              |
| СН Прям                                   | 435          | 1643P                        | 47                           | 252.30                | 5.71                         | 47.3                             | 1.30                    | 0.21                | 1.51                     | 12.5                    | 234.2 ( 54%)  | 16.4 ( 4%)      | 250.6 ( 58%)    |              |
| СН Лев                                    | 212          | 0                            | 39                           | 122.96                | 2.91                         | 49.5                             | 0.74                    | 0.12                | 0.86                     | 14.7                    | 122.1 ( 58%)  | 11.7 ( 6%)      | 133.9 ( 64%)    |              |
| 1   | 113          | 530                          | 1764                         | 52                    | 530.00                       | 10.77                            | 73.2                    | 1.66                | 0.28                     | 1.94                    | 13.2          | 297.6 ( 56%)    | 20.2 ( 4%)      | 317.8 ( 60%) |
| 1   | 114          | 559                          | 1782                         | 55                    | 324.22                       | 7.51                             | 48.4                    | 1.78                | 0.32                     | 2.11                    | 13.6          | 320.0 ( 57%)    | 22.2 ( 4%)      | 342.1 ( 62%) |
| 1 :                                       | 2420         | МАХ =                        | 55                           | 1657.48               | 37.06                        |                                  | 8.25                    | 1.18                | 9.43                     | 14.0                    | 1372.0 ( 57%) | 102.6 ( 4%)     | 1474.6 ( 61%)   |              |
| Движение/<br># узла                       | станд.       | макс. длина очереди<br>Случ. | полн.<br>а/секм. ( м/полосы) | полн.<br>а-ч          | полн.<br>Оч-ди<br>время<br>% | Крит.<br>оц-ки                   | Расх.<br>Толл.<br>Лиг   | Эфф.<br>Зел.<br>сек | Тип<br>Пр-я              | Сервиса                 |               |                 |                 |              |
| СН Прям                                   | 1.5 ( 8)     | 0.1 ( 1)                     | 1.6 ( 9)                     | 0.0 ( 0)              | 0.0                          | N                                | 3.48                    | 25.0                | 3                        | C                       |               |                 |                 |              |
| СН Лев                                    | 0.9 ( 8)     | 0.1 ( 1)                     | 1.0 ( 9)                     | 0.0 ( 0)              | 0.0                          | N                                | 2.27                    | 25.0                | 3                        | C                       |               |                 |                 |              |
| КН Прям                                   | 1.9 ( 15)    | 0.2 ( 2)                     | 2.1 ( 17)                    | 0.0 ( 0)              | 0.0                          | N                                | 4.47                    | 25.0                | 3                        | C                       |               |                 |                 |              |
| ВН Прям                                   | 3.7 ( 30)    | 0.3 ( 2)                     | 3.9 ( 32)                    | 131.0 ( 998)          | 0.0                          | N                                | 34.80                   | 50.0                | 3                        | B                       |               |                 |                 |              |
| ВН Лев                                    | 1.2 ( 8)     | 0.2 ( 1)                     | 1.4 ( 9)                     | 6.0 ( 46)             | 0.0                          | N                                | 13.42                   | 50.0                | 3                        | B                       |               |                 |                 |              |
| СН Прям                                   | 5.3 ( 38)    | 0.4 ( 3)                     | 5.8 ( 41)                    | 75.0 ( 571)           | 0.0                          | N                                | 33.69                   | 50.0                | 3                        | B                       |               |                 |                 |              |
| СН Лев                                    | 2.2 ( 15)    | 0.3 ( 2)                     | 2.5 ( 17)                    | 6.0 ( 46)             | 0.0                          | N                                | 17.03                   | 50.0                | 3                        | B                       |               |                 |                 |              |

Рисунок Б.41 – Результаты моделирования

Также на этом экране можно оценить показатели эффективности управления дорожным движением, такие как общий пробег, время в пути, задержки, остановки транспорта, время нахождения в пробке, объем использованного топлива, эксплуатационные затраты и т. д. (рисунок Б.42).

| Основные показатели | единицы    | Системное значение |
|---------------------|------------|--------------------|
| Полн. пробег        | а-км/ч     | 1657               |
| Время полн. пробега | а-ч/ч      | 37                 |
| Полн. остан. з-жка  | а-ч/ч      | 9                  |
| Полн. случ. з-жка   | а-ч/ч      | 1                  |
| Общая з-жка         | а-ч/ч      | 9                  |
| Сред. з-жка         | сек/а      | 14.0               |
| З-жка пассаж.       | рак-а/ч    | 11                 |
| Станд. ост-ки:      | а/ч        | 1372               |
|                     | %          | 57                 |
| Случ. ост-ки:       | а/ч        | 103                |
|                     | %          | 4                  |
| Полн. ост-ки:       | а/ч        | 1475               |
|                     | %          | 61                 |
| Степ. насщ. > 1     | # Сегменты | 0                  |
| Удли. оч-ди         | # Сегменты | 3                  |
| Время в пробке      | %          | 0                  |
| Длина периода       | сек        | 900                |
| Сист. Ск-сть        | км/ч       | 46.8               |
| Раск. Топл.         | Литр/ч     | 215                |
| Опер. затраты       | \$/ч       | 440                |
| Индекс эф-сти       | DI         | 19.50              |

Рисунок Б.42 – Показатели эффективности

#### Восьмой шаг – процесс оптимизации.

Для этого выбираем меню «Правка – Анализ». В появившемся окне «Параметры расчета – Оптимизация» выбираем то, что хотим оптимизировать – длительности фаз и длительность цикла. Для оптимизации существующего цикла используем генетический алгоритм, так как он более предпочтителен с математической точки зрения, чем метод кратчайшего спуска.

Настроим параметры генетического алгоритма при помощи окна «Параметры генетического алгоритма», расположенного в средней части экрана «Параметры расчета». Окно «Параметры генетического алгоритма» представлено на рисунке Б.43.

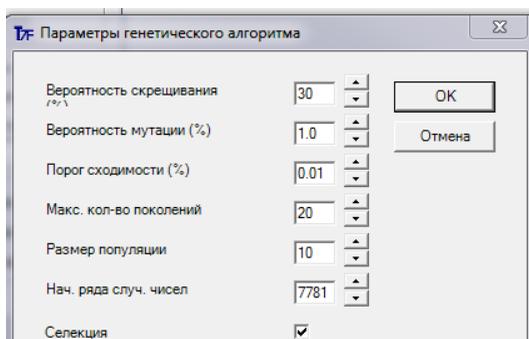


Рисунок Б.43 – Окно «Параметры генетического алгоритма»

Параметры влияют на время, необходимое для отыскания глобального оптимального решения. Обычно большинство параметров генетического алгоритма не нуждается в настройке пользователем.

1 Скрещивания и мутации: генетический алгоритм начинает работу с рассмотрения пробной группы вариантов (популяции) расписания. Внутри группы вариантов имеет место конкуренция, в ходе которой худшие варианты отсеиваются, а лучшие допускаются к операции дальнейшего изменения.

Под изменением понимается математический способ создания лучших из группы сильных вариантов. Рекомендуется оставить величину скрещивания нетронутой, по умолчанию равной 30 %. Обычно величины меньше 30 % и выше 70 % снижают эффективность оптимизации.

Мутация представляет собой произвольную модификацию случайно выбранных параметров. На пропорцию изменяемых параметров влияет значение вероятности мутаций. Мутация позволяет алгоритму находить глобальный оптимум вместо локального. Для малых сетей с 4 перекрестками (узлами) или меньше рекомендуется устанавливать данный параметр в размере 4 %, для больших сетей – 1 %.

2 Размер популяции: количество вариантов каждого поколения. По умолчанию размер популяции для нового файла данных устанавливается равным 10, но программа дает пользователю возможность выбора значений из диапазона 6–99. Для простых оптимизационных задач, то есть если оптимизируются только смещение и длительности фаз рекомендуется устанавливать 10 популяций. Для сложных задач, то есть оптимизация фазовой последовательности вместе с длительностью фаз, – 20 популяций.

3 Селекция элиты: в результате селекции поколения выбираются лучшие варианты. Порог сходимости и максимальное количество поколений: сходимость достигается, когда среднее значение функции становится достаточно близким к оптимальному значению. Рекомендуется оставлять эту величину без изменения, по умолчанию равной 0,01 %. Максимальное количество поколений для маленьких сетей достаточно установить 50 групп, для больших сетей – 200.

4 Начало ряда случайных чисел: скрещивание, мутация и конкуренция между вариантами подразумевают определенную степень случайности. Чтобы обеспечить действительную «математическую случайность», рекомендуется выбирать значение начала ряда случайных чисел из величин, которые заканчиваются одной из следующих цифр: 1, 3, 7 или 9. В большинстве случаев рекомендуется не изменять это значение. Если другие параметры генетического алгоритма выбраны корректно, то процесс оптимизации пройдет успешно.

Окно «Параметры генетического алгоритма» с необходимыми настройками перекрестка с целью оптимизации параметров светофорного

регулирования представлено на рисунке Б.44.

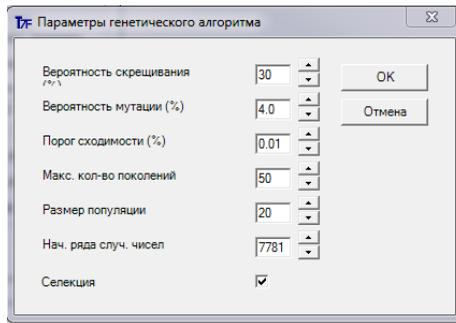


Рисунок Б.44 – Настройки окна «Параметры генетического алгоритма»

Выбираем функцию оптимизации «Показатель невыгодности» (DI), а в качестве показателя невыгодности – задержки.

Для оптимизации длительности цикла необходимо задать диапазон длительностей, в пределах которого осуществляется поиск оптимального решения: в качестве минимальной длительности цикла установим 47 с, так как в окне «Расписание для перекрестка» (меню «Правка – Расписание») указываем минимальные длительности фаз 20 и 27 с; в качестве максимальной длительности цикла установим 90 с, так как существуют ограничения на длительность цикла в зависимости от количества фаз ( $C_{\max} \leq 90$  с – для двухфазного цикла;  $C_{\max} \leq 120$  с – для остальных циклов). Шаг цикла установим равным 1 с. Отредактированное окно «Параметры расчета» для оптимизации длительностей цикла и фаз представлено на рисунке Б.45.

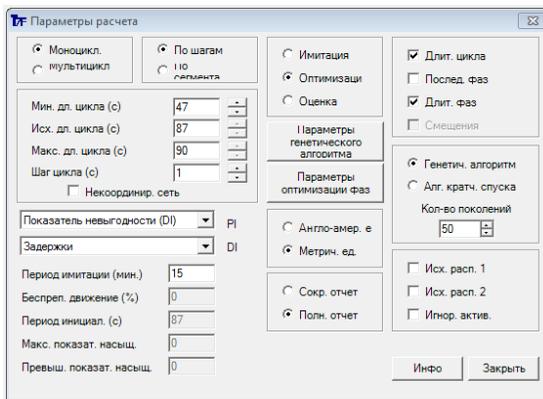


Рисунок Б.45 – Отредактированное окно «Параметры расчета»

После того как модель создана, выполняется запуск оптимизационного расчета с учетом заданных параметров нажатием на значок , в результате на экране появится окно, где можно просмотреть длительность цикла и длительность фаз до и после оптимизации, показателей работы перекрестка: суммарная задержка, количество остановок, расход топлива, время пробега (рисунок Б.46). Также на этом экране отражаются общие сведения о проекте и входные параметры генетического алгоритма.

| узел           | цикл       | офсет      | фазы С-Ю   | фазы В-З      |               |
|----------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
|                | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч.    |               |
| 1              | 87 70      | ---        | ---        | ---           |               |
| узел раздел.#1 |            | раздел.#2  |            |               |               |
|                | нач.оконч. | нач.оконч. |            |               |               |
| 1              | 56 43      | 31 27      |            |               |               |
|                | задержка   | полное     | расход     | время         | индекс        |
|                | управления | к-во       | топлива    | пробега       | эффективности |
|                | (сек/авт)  | (%)        | (Лит/час)  | (авт-час/час) |               |
| Начальное      | 14.0       | 57         | 215        | 37            | 14.00         |
| оконча.        | 11.3       | 54         | 208        | 35            | 11.30         |

Рисунок Б.46 – Результаты оптимизационного расчета

В результате оптимизации длительность цикла уменьшилась до 70 с, длительность первой фазы составляет 43 с, второй – 27 с.

Чтобы получить типовой подробный выходной отчет, включающий информацию о загрузке сегментов, статистику дорог, таблицы расписаний сигналов и пр., загрузим `runch`-файл с расширением `*.rpn`, который по существу представляет собой копию исходного входного файла (`*.tin`), содержит оптимальный вариант управления сигналами, полученный в результате оптимизации, и, используя данные этого файла, осуществим сеанс имитации.

Результаты имитации в виде отчета приведены на рисунке Б.47, а, а данные, представленные в виде показателей эффективности управления дорожным движением, – на рисунке Б.47, б.

а)

| Проект: Модель перекрестка.tif                |                              |                            |                    |                        |                       |                                  |                  |                          |                         |                  |               |                  |               |
|---|------------------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| Процедура с начальными установочными данными> |                              |                            |                    |                        |                       |                                  |                  |                          |                         |                  |               |                  |               |
| Движение/<br>№ узла                           | Поток<br>а/ч                 | Интен-<br>сивность<br>а/чз | Степ.<br>нас.<br>% | Полн.<br>пробег<br>а-м | Время<br>полн.<br>а-ч | Время<br>проб.<br>Срдн.<br>сек/а | Станд.<br>Станд. | Задержка<br>случ.<br>а-ч | Полн.<br>Полн.<br>сек/а | Станд.<br>Станд. | Остановки     |                  |               |
|   |                              |                            |                    |                        |                       |                                  |                  |                          |                         |                  | Станд.        | Случ.<br>(а/ч,%) | Полн.         |
| СН Прям                                       | 83                           | 1778P                      | 22                 | 0,00                   | 0,50                  | 21,6                             | 0,47             | 0,03                     | 0,50                    | 21,6             | 62,6 ( 75%)   | 6,5 ( 8%)        | 69,1 ( 84%)   |
| Лев   | 54                           | 0                          | 18                 | 0,00                   | 0,30                  | 20,0                             | 0,28             | 0,02                     | 0,30                    | 20,0             | 40,8 ( 75%)   | 5,2 ( 10%)       | 46,0 ( 86%)   |
| ЮН Прям                                       | 119                          | 1787P                      | 34                 | 0,00                   | 0,60                  | 18,1                             | 0,51             | 0,09                     | 0,60                    | 18,1             | 82,0 ( 69%)   | 11,9 ( 11%)      | 94,0 ( 79%)   |
| ВН Прям                                       | 313                          | 1643P                      | 32                 | 313,00                 | 5,97                  | 68,7                             | 0,68             | 0,08                     | 0,76                    | 8,7              | 135,4 ( 43%)  | 10,9 ( 4%)       | 146,3 ( 47%)  |
| Лев   | 115                          | 0                          | 23                 | 115,00                 | 2,28                  | 71,2                             | 0,32             | 0,03                     | 0,36                    | 11,2             | 93,4 ( 81%)   | 6,9 ( 7%)        | 100,3 ( 88%)  |
| ЗН Прям                                       | 435                          | 1643P                      | 43                 | 252,30                 | 5,41                  | 44,8                             | 1,04             | 0,17                     | 1,20                    | 10,0             | 206,0 ( 47%)  | 17,7 ( 5%)       | 223,7 ( 52%)  |
| Лев   | 212                          | 0                          | 35                 | 122,96                 | 2,73                  | 46,3                             | 0,59             | 0,09                     | 0,68                    | 11,5             | 139,4 ( 66%)  | 12,3 ( 6%)       | 151,8 ( 72%)  |
| 1   | 113                          | 530                        | 1764               | 48                     | 530,00                | 10,38                            | 70,5             | 1,32                     | 0,23                    | 1,54             | 262,2 ( 49%)  | 21,6 ( 5%)       | 283,8 ( 54%)  |
| 1   | 114                          | 559                        | 1782               | 51                     | 324,22                | 7,08                             | 45,6             | 1,42                     | 0,26                    | 1,67             | 288,2 ( 52%)  | 23,5 ( 5%)       | 311,6 ( 56%)  |
| 1 :   | 2420                         | MAX = 51                   | 1657,48            | 35,24                  |                       |                                  | 6,62             | 0,99                     | 7,61                    | 11,3             | 1310,0 ( 54%) | 116,5 ( 5%)      | 1426,6 ( 59%) |
| Движение/<br>№ узла                           | -----макс.длина очереди----- |                            |                    | км-ость<br>Оч-ди       | полн.<br>время<br>%   | Крит.<br>сегм                    | Расх.<br>Топл.   | Эфф.<br>Вел.<br>сек      | Тип<br>Пр-я             | Сервиса          |               |                  |               |
|   | станд.                       | Случ.                      | Полн.              |                        |                       |                                  |                  |                          |                         |                  |               |                  |               |
| СН Прям                                       | 1.2 ( 8)                     | 0.1 ( 1)                   | 1.3 ( 9)           | 0.0 ( 0)               | 0.0                   | N                                | 3.40             | 21.0                     | 3                       | C                |               |                  |               |
| Лев   | 0.7 ( 8)                     | 0.1 ( 1)                   | 0.8 ( 9)           | 0.0 ( 0)               | 0.0                   | N                                | 2.15             | 21.0                     | 3                       | C                |               |                  |               |
| ЮН Прям                                       | 1.4 ( 8)                     | 0.3 ( 2)                   | 1.7 ( 10)          | 0.0 ( 0)               | 0.0                   | N                                | 4.91             | 21.0                     | 3                       | B                |               |                  |               |

б)

Системные характеристики : для всех узлов

| Основные показатели | единицы    | Системное |
|---------------------|------------|-----------|
|                     |            | значение  |
| Полн.пробег         | а-км/ч     | 1657      |
| Время полн.пробега  | а-ч/ч      | 35        |
| Полн.стан. з-жка    | а-ч/ч      | 7         |
| Полн.случ.з-жка     | а-ч/ч      | 1         |
| Общая з-жка         | а-ч/ч      | 8         |
| Сред.з-жка          | сек/а      | 11,3      |
| З-жка пассаж.       | рак-а/ч    | 9         |
| Станд.ост-ки:       | а/ч        | 1310      |
|                     | %          | 54        |
| Случ.ост-ки:        | а/ч        | 117       |
|                     | %          | 5         |
| Полн.ост-ки:        | а/ч        | 1427      |
|                     | %          | 59        |
| Степ.насыщ. > 1     | # Сегменты | 0         |
| Удлин.оч-ди         | # Сегменты | 3         |
| Время в пробке      | %          | 0         |
| Длина периода       | сек        | 900       |
| Сист. Ск-сть        | км/ч       | 49,0      |
| Расх. Топл.         | Лит/ч      | 208       |
| Опер.затраты        | \$/ч       | 430       |
| Индекс эф-сти       | DI         | 7,6108    |

Рисунок Б.47 – Результаты имитации:  
 а – отчет о текущих транспортных данных  
 б – показатели эффективности управления ДД

## Б.4 Последовательность расчета двух связанных перекрестков

Программный продукт Transyt-7FR предназначен для расчетов одного или нескольких (до 99) связанных перекрестков. В качестве ознакомительного исследования с демоверсией программы Transyt-7FR произведем расчет для двух связанных перекрестков г. Гомеля (Мазурова – Кожара – Бородина и Каменщикова – Мазурова – Огоренко) с организацией координированного светофорного регулирования между ними.

Размещение двух перекрестков на местности показано на рисунке Б.48.

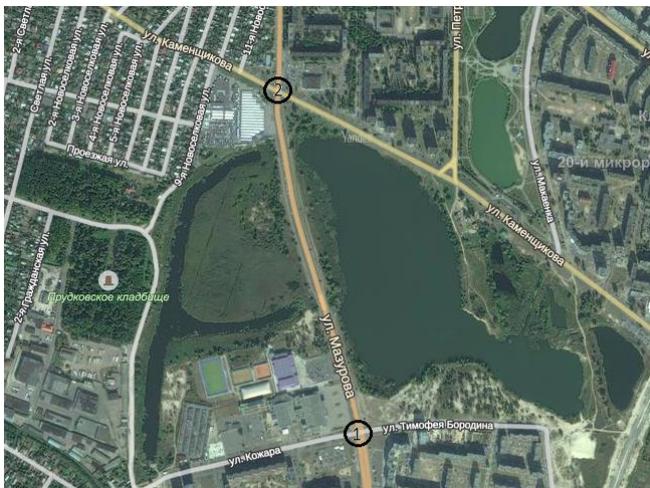


Рисунок Б.48 – Размещение перекрестков на дорожной сети г. Гомеля

При расчете параметров регулирования для двух связанных перекрестков в среде Transyt-7FR для второго узла ввод исходных параметров аналогичен действиям при создании первого перекрестка.

### Характеристика перекрестка Каменщикова – Мазурова – Огоренко.

1 Регулируемый перекресток Каменщикова – Мазурова – Огоренко является четырехсторонним, имеет Х-образную форму (масштаб – 1:800).

2 В нерегулируемом режиме ул. Каменщикова является главной, ул. Огоренко и ул. Мазурова – второстепенными. На главной и второстепенной дорогах имеется по две основных полосы для движения в каждую сторону (ширина полосы 3,5 м). На подъезде к перекрестку по улице Мазурова (вход С) имеется дополнительная полоса шириной 3,5 м для поворота налево или разворота.

3 Организовано движение МТС (автобусов, троллейбусов, маршрутных такси). На каждом из четырех выходов перекрестка размещены ОП МТС, оборудованные заездными карманами и обозначенные дорожными знаками 5.12.1 «Остановочный пункт автобуса и (или) троллейбуса».

4 На ул. Мазурова и ул. Каменщикова установлены ограничивающие пешеходные ограждения.

5 Основными объектами тяготения пешеходов являются рынок «Прудковский», «Хоум кредит банк», торговый центр, ОП.

6 Состояние проезжих частей вблизи перекрестка удовлетворительное, есть отдельные выбоины.

7 Максимальная разрешенная скорость движения на подходах к перекрестку – 60 км/ч.

8 Регулирование движения ТП осуществляется транспортными светофорами Т.1.п на входе D, Т.1 на входах А и В, Т.1.л на входе С. Дублирующие светофоры размещены за перекрестком слева от проезжей части.

9 На каждом входе на перекресток размещены регулируемые пешеходные переходы, оборудованные пешеходными светофорами П.2. Пешеходные переходы устроены под прямым углом к оси проезжей части, обозначены дорожными знаками 5.16.2, 5.16.1 и разметкой 1.14.3.

10 Эскизный план перекрестка с картограммой интенсивности движения ТС (по полосам) и пешеходов приведен на рисунке Б.49.

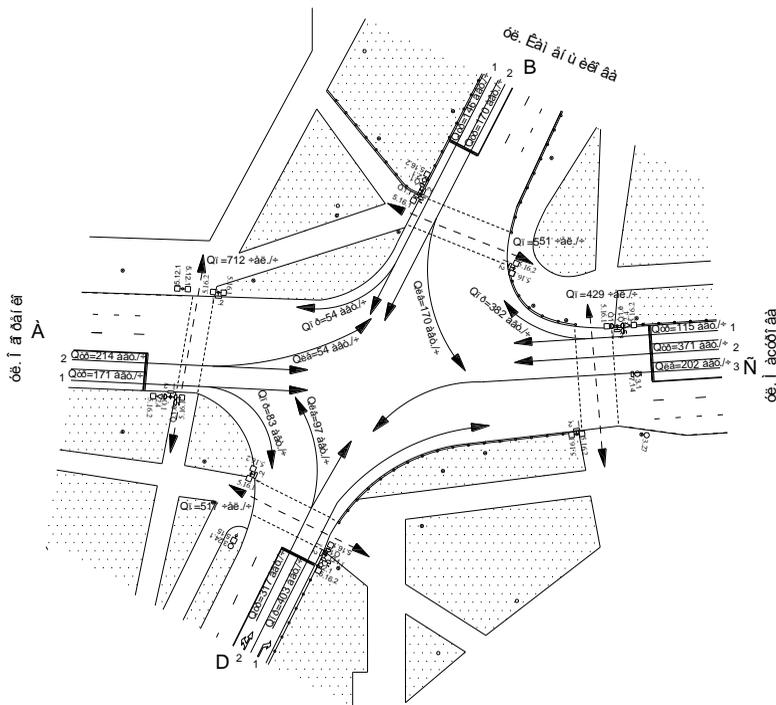


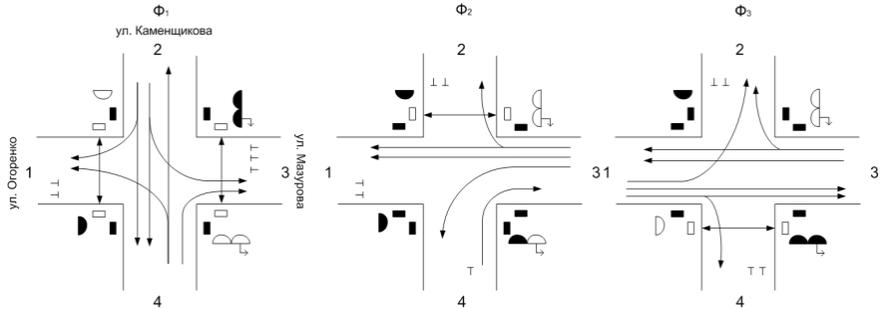
Рисунок А.49 – Эскизный план исследуемого перекрестка с указанием

интенсивности движения ТС по полосам и интенсивность движения пешеходов

11 Схема светофорного регулирования – трехфазная с длительностью цикла 94 с.

Схема пофазного движения и диаграмма регулирования представлены на рисунке Б.50.

а)



б)

| Направление    | Ф <sub>1</sub> |   |     | Ф <sub>2</sub> |   |    | Ф <sub>3</sub> |   |    | Т <sub>ж</sub> | Т <sub>к</sub> | Т <sub>юк</sub> |   |
|----------------|----------------|---|-----|----------------|---|----|----------------|---|----|----------------|----------------|-----------------|---|
|                | ЗЕЛ            | Ж | КР  | ЗЕЛ            | Ж | КР | ЗЕЛ            | Ж | КР |                |                |                 |   |
| 2-1,3,4; 4-1,2 | ЗЕЛ            | Ж | КР  |                |   |    |                |   |    | 29             | 3              | 59              | 3 |
| 3-1,2          | КР             | Ж | ЗЕЛ |                |   |    |                |   |    | 53             | 3              | 35              | 3 |
| 1-2,3,4        | КР             | Ж | ЗЕЛ |                |   |    |                |   |    | 29             | 3              | 59              | 3 |
| 4-3            | ЗЕЛ            | Ж | КР  |                |   |    |                |   |    | 55             | —              | 39              | — |
| 3-4            | КР             | Ж | ЗЕЛ |                |   |    |                |   |    | 20             | —              | 74              | — |
| П-1,3          | ЗЕЛ            | Ж | КР  |                |   |    |                |   |    | 22             | —              | 72              | — |
| П-2            | КР             | Ж | ЗЕЛ |                |   |    |                |   |    | 24             | —              | 70              | — |
| П-4            | КР             | Ж | ЗЕЛ |                |   |    |                |   |    | 21             | —              | 73              | — |

Рисунок Б.50 – Схема светофорного регулирования на перекрестке улиц Каменщикова – Мазурова – Огоренко:

а – схема пофазного движения; б – диаграмма регулирования;

Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub> – соответственно первая и вторая фазы регулирования;

1–4 – направления движения на перекрестке; П – пешеходные потоки

12 Исследование интенсивности и состава ТП производилось в течение 10 светофорных циклов с каждого входа (период времени с 17:00 до 18:00, час пик).

13 Основную долю в ТП составляют легковые автомобили.

14 Результаты замера числа ТС по каждому циклу измерений (соответствующему циклу регулирования), необходимые для работы в среде Transyt-7FR, приведены в таблице Б.7.

**Таблица Б.7 – Результаты замера числа ТС, въехавших с каждого входа на перекресток для каждого цикла по направлениям**

| Номер цикла | Вход   |       |         |        |       |         |        |       |         |        |       |         |
|-------------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|
|             | А      |       |         | В      |       |         | С      |       |         | D      |       |         |
|             | налево | прямо | направо |
| 1           | 2      | 6     | 3       | 7      | 6     | –       | 5      | 11    | 10      | 3      | 8     | 2       |
| 2           | 4      | 13    | 3       | 7      | 5     | 2       | 1      | 7     | 12      | 1      | 10    | 4       |
| 3           | 2      | 14    | 3       | 3      | 6     | 2       | 3      | 11    | 9       | 3      | 5     | 2       |
| 4           | –      | 12    | 4       | 3      | 7     | –       | 7      | 15    | 12      | 4      | 7     | –       |
| 5           | 1      | 8     | 2       | 2      | 5     | –       | 2      | 9     | 9       | 4      | 10    | 1       |
| 6           | 2      | 13    | –       | 6      | 1     | 1       | 4      | 12    | 9       | 2      | 8     | 2       |
| 7           | 1      | 11    | 2       | 4      | 4     | 3       | 5      | 16    | 8       | 1      | 11    | 1       |
| 8           | 1      | 4     | 3       | 4      | 3     | 2       | 10     | 18    | 12      | 3      | 7     | 1       |
| 9           | –      | 10    | 1       | 5      | 3     | 2       | 7      | 18    | 11      | 2      | 9     | –       |
| 10          | 1      | 10    | 1       | 3      | 1     | 2       | 9      | 10    | 8       | 2      | 8     | 1       |
| $\Sigma$    | 14     | 101   | 22      | 44     | 41    | 14      | 53     | 127   | 100     | 25     | 83    | 14      |

Результаты расчета средней интенсивности движения по направлениям представлены в таблице Б.8.

**Таблица Б.8 – Результаты расчета средней интенсивности движения**

| Направление  | Вход   |       |         |        |       |         |        |       |         |        |       |         |
|--------------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|
|              | А      |       |         | В      |       |         | С      |       |         | D      |       |         |
|              | налево | прямо | направо |
| $q$ , авт./с | 0,015  | 0,107 | 0,023   | 0,047  | 0,04  | 0,015   | 0,056  | 0,135 | 0,106   | 0,027  | 0,09  | 0,112   |
| $Q$ , авт./ч | 54     | 385   | 83      | 170    | 158   | 54      | 202    | 486   | 382     | 97     | 317   | 403     |

Результаты замера интенсивности движения пешеходов и интенсивности движения на пешеходных переходах с каждого входа в течение 10 светофорных циклов, представлены в таблице Б.9.

**Таблица Б.9 – Результаты замера интенсивности движения пешеходов**

| Интенсивность    | Вход |     |     |     |
|------------------|------|-----|-----|-----|
|                  | А    | В   | С   | D   |
| $n_z$            | 186  | 144 | 112 | 135 |
| $Q_{п}$ , чел./ч | 712  | 712 | 712 | 712 |

По результатам исследования картограмма интенсивностей транспортных и пешеходных потоков приведена на рисунке Б.51.

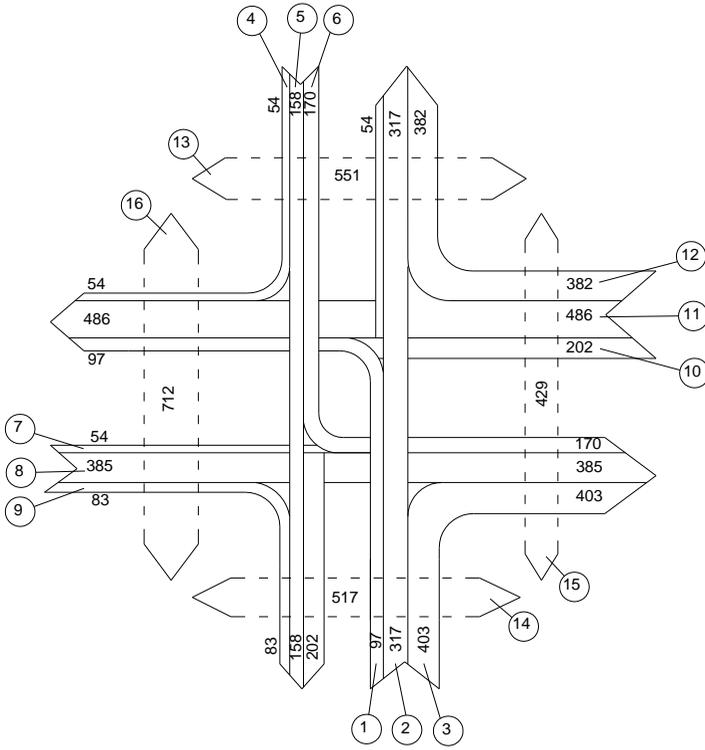


Рисунок Б.51 – Картограмма интенсивностей транспортных и пешеходных потоков

**Расчет параметров светофорного регулирования для двух связанных регулируемых перекрестков**

Первый шаг – **добавление узла**. Добавление узла осуществим при помощи экрана «Карта», который обеспечивает отображение геометрии транспортной сети и поддерживает инструменты редактирования связанных с ней входных данных. Окно карты открывается с помощью команды меню «Правка – Карта» (рисунок Б.52). Окно карты представлено на рисунке Б.53.

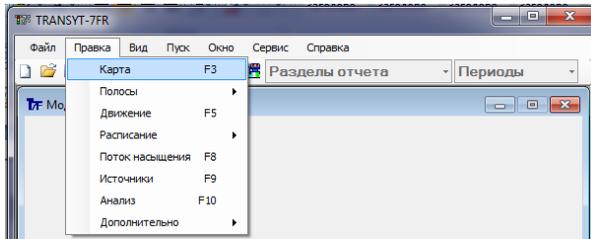


Рисунок Б.52 – Меню «Правка – Карта»

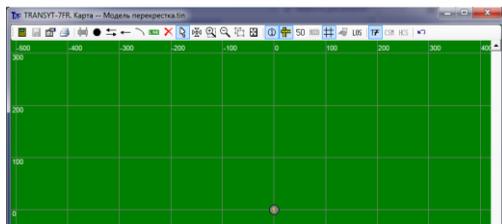


Рисунок Б.53 – Окно карты

Нажав на значок , создадим узел в точке с координатами  $(-1000; 0)$ , так как расстояние между исследуемыми перекрестками составляет 1000 м. Заполняем окно «Добавление узла». Элементы окна «Добавление узла» аналогичны элементам окна «Создание входного файла Transyt».

В окне «Добавление узла» необходимо ввести параметры для нового узла (рисунок Б.54):

- номер нового узла – оставляем по умолчанию равным 2;
- интенсивность движения, ТС/ч, – оставляем по умолчанию 100;
- поправка на часы пик – так как исследование интенсивности на перекрестке проводилось в пиковый период, поправка на часы пик будет составлять 1,00;
- интенсивность движения на зеленый сигнал, ТС/ч, – 1800;
- длина сегмента, м, – оставляем без изменения;
- скорость свободного потока машин, км/ч, – 60;
- количество фаз – 3;
- длительность желтого, с, – 3;
- длительность красного, с, – 3.

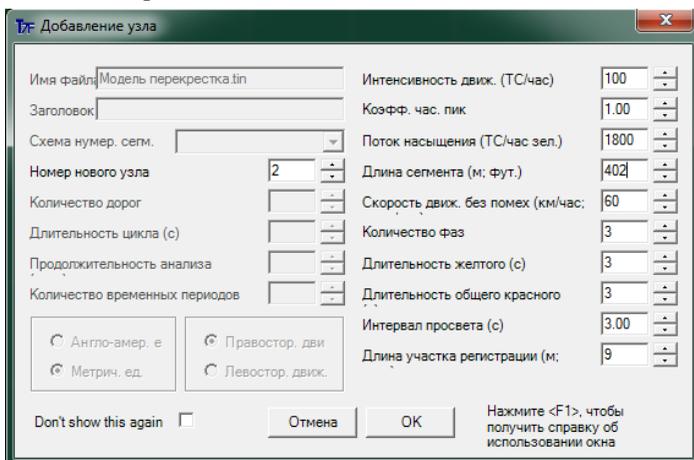


Рисунок Б.54 – Ввод параметров в окне «Добавление узла»

После заполнения – нажимаем клавишу «ОК».  
 Результаты добавления узла в окне карты представлены на рисунке Б.55.

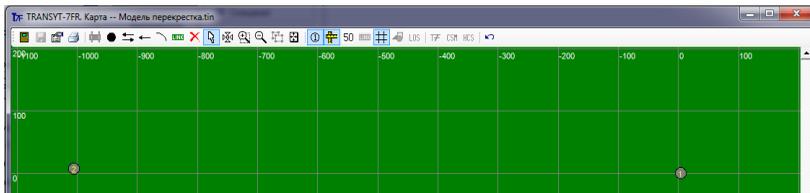


Рисунок Б.55 – Наличие двух узлов

Второй шаг – **создание полос движения** (меню «Правка – Полосы»).

Создаем полосы во всех направлениях: север, юг, запад, восток – в соответствии с рисунком Б.56. В меню переключения между узлами перекрестка переключимся на узел № 2. В западном направлении на полосе № 2 установим переключатель в положение «По полосам» для обеспечения использования дополнительного сегмента № 213 при моделировании сложного подъезда.

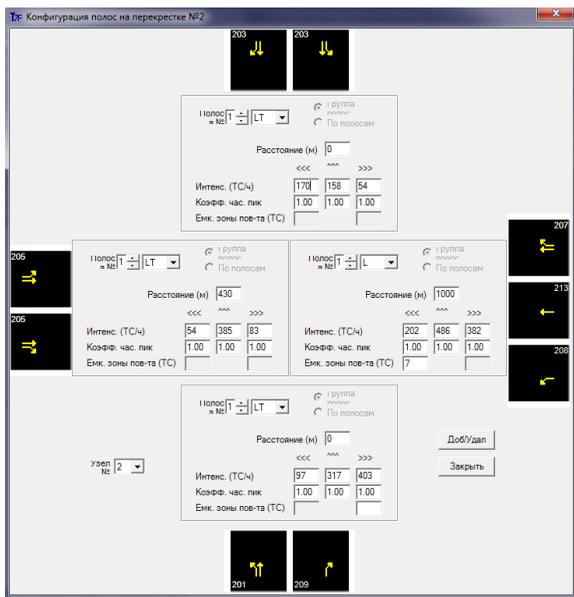


Рисунок Б.56 – Результаты создания полос движения

Для поля ввода «Расстояние» примем следующие значения: в северном и южном направлениях сегменты подъезда кодируются как внешние, поэтому нет необходимости задавать расстояние; в восточном направлении

расстояние от ближайшего регулируемого перекрестка составляет 430 м, в западном – 1000 м, это внутренние сегменты, так как могут демонстрировать групповой характер прибытия ТС.

Введем данные об интенсивности ТП в соответствии с картограммой (см. рисунок Б.51). Коэффициент в час пик оставляем по умолчанию 1. Введем емкость зоны поворота для западного направления – около 7 ТС.

Третий шаг – **окно «Движение на перекрестке»** (меню «Правка – Движение»).

Для рассматриваемого перекрестка предполагается, что заданные значения длины сегмента в окне «Конфигурации полос» заданы, потерь времени на старте и удлинения эффективного зеленого сигнала в изменении не нуждаются. Осуществляем анализ по полосам, то в такой ситуации оказывается важным применение окна «Движение» с целью кодирования точных значений интенсивности для каждой полосы (сегменты № 207 и 213).

На рисунке Б.57 показано изменение интенсивности движения для сегментов № 207 и 213.

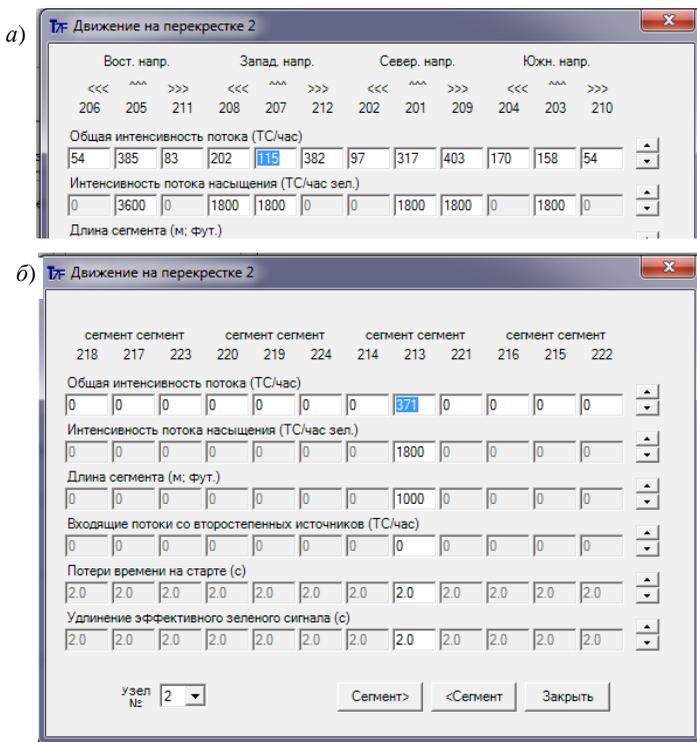


Рисунок Б.57 – Изменение интенсивности движения для сегментов:  
*a* – № 206–210; *б* – № 218–222

Пятый шаг – задание фазовых таблиц (меню «Правка – Расписание»).

В меню переключения между узлами перекрестка переключимся на узел № 2 и начнем с редактирования фазы № 1.

В списке «С / Ю / З / В» выбираем подъезд на север, подлежащий редактированию. Далее указываем, какие из направлений активны: прямо, направо и налево. Затем в списке «С / Ю / З / В» выбираем подъезд на юг и указываем, какие из направлений активны: прямо, направо и налево. Аналогично редактируются фазы № 2 и 3.

Установим продолжительность горения зеленого, желтого и общего красного в соответствии с диаграммой регулирования, представленной на рисунке 3.52. Для всех фаз минимальная длительность увеличена для обеспечения безопасности пешеходов (рассчитано аналогично, как и для перекрестка на пересечении улиц Мазурова – Кожара – Бородина): первая фаза – 24 с, вторая фаза – 22 с, третья фаза – 22 с, при условии, что переходной интервал составляет 6 с для первой и третьей фазы и 4 с – для второй, т. к. во второй фазе нет желтого интервала, а «ложный» интервал желтого должен быть закодирован и его продолжительность 1 с, а продолжительность красного – 3 с.

Для узла № 1 и узла № 2 установим флажок «Координированный сигнал», так как целью является расчет перекрестков как части координированной сети, смещение оставим по умолчанию (0), опорный интервал для узла № 1 примем № 1, а для узла № 2 – № 4 (интервал, который является началом горения зеленого сигнала для восточного направления движения). Флажок «Оптимиз. смещений» для узла № 1 отключается автоматически.

Заполненные окна «Расписание для перекрестка» для узлов № 1 и 2 представлены на рисунке Б.63.

Шестой шаг – расчет потока насыщения (меню «Правка – Дополнительно – Пропускная способность»). Число ТС по видам для каждого сегмента представлено в таблице Б.10, а параметры сегментов сведены в таблицу Б.11.

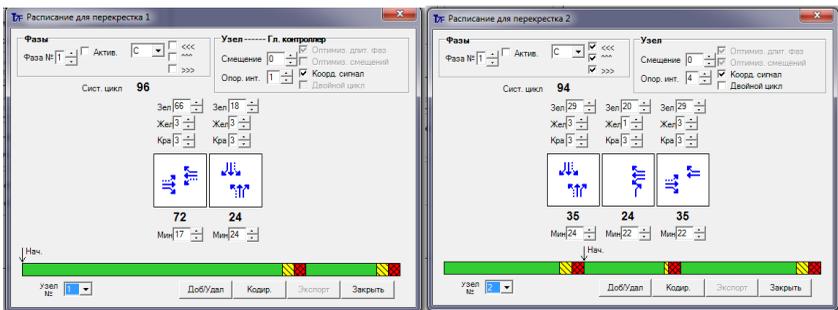


Рисунок Б.58 – Заполненное окно «Расписание для перекрестка» для узлов № 1 и 2

**Таблица Б.10 – Число ТС по видам для каждого сегмента**

| Номер сегмента | Направление | Число ТС по видам |
|----------------|-------------|-------------------|
| 206            | Налево      | 13Л, 1Г           |
| 205            | Прямо       | 90Л, 2Г, 40, 5С   |
| 211            | Направо     | 21Л, 1О           |
| 204            | Налево      | 42Л, 1О, 1С       |
| 203            | Прямо       | 39Л, 2О           |
| 210            | Направо     | 14Л               |
| 208            | Налево      | 51Л, 2Г           |
| 213            | Прямо       | 95Л, 2Г           |
| 207            | Прямо       | 24Л, 1О, 5С       |
| 212            | Направо     | 96Л, 3О, 1С       |
| 202            | Налево      | 22Л, 1О, 2С       |
| 201            | Прямо       | 79Л, 1Г, 3О       |
| 209            | Направо     | 103Л, 2Г          |

**Таблица Б.11 – Параметры для расчета потока насыщения**

| Номер сегмента  | 201                | 203                 | 205                  | 207                | 208   | 209    | 213         |
|---|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------|--------|-------------|
| Базисный свободный поток, ТС/п/чз                       | 1800               |                     |                      |                    |       |        |             |
| Количество полос  | 1                  | 2                   | 2                    | 1                  | 1     | 1      | 1           |
| Ширина полосы, м  | 3,5                | 3,5                 | 3,5                  | 3,5                | 3,5   | 3,5    | 3,5         |
| Грузовой транспорт, %                                   | 1                  | 0                   | 2                    | 0                  | 4     | 2      | 2           |
| Уклон, %  | 0                  | 0                   | 0                    | 0                  | 0     | 0      | 0           |
| Количество парковок                                     | Стоянка запрещена  |                     |                      |                    |       |        |             |
| Количество останавливающихся автобусов                  | 0                  | 0                   | 0                    | 0                  | 0     | 0      | 0           |
| Тип зоны  | Другой             |                     |                      |                    |       |        |             |
| Использование полос                                     | Список блокируется | Очень неравномерное | Слегка неравномерное | Список блокируется |       |        |             |
| Направление движения                                    | Прямо              |                     |                      |                    | Влево | Вправо | Прямо       |
| Влияние пешеходов или велосипедистов на левом повороте  | Среднее            | Среднее             | Отсутствует          |                    |       |        |             |
| Влияние пешеходов или велосипедистов на правом повороте | Отсутствует        | Среднее             | Среднее              | Незначительное     |       |        | Отсутствует |
| Поток насыщения, ТС/чз                                  | 1588               | 2453                | 2986                 | 1693               | 1625  | 1410   | 1746        |

Используем окно «Движение на перекрестке» (меню «Правка – Движение» для просмотра результата корректировки величины потоков насыщения (рисунок Б.59).

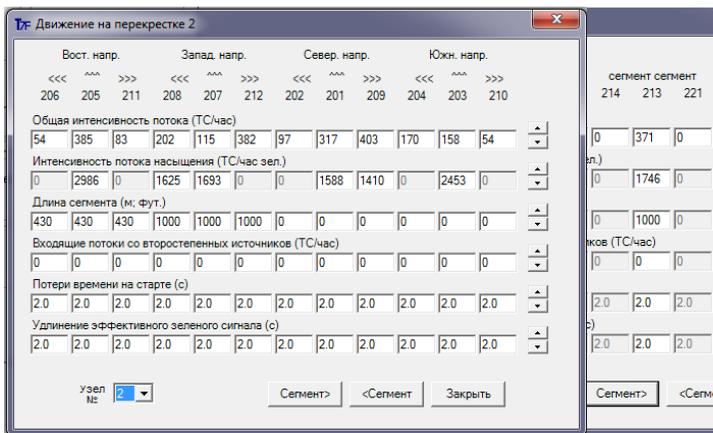


Рисунок Б.59 – Откорректированные величины потока насыщения

Седьмой шаг – для корректной оптимизации координированного управления в среде Transyt необходимо правильно указать **связи между сегментами**. При помощи меню «Правка – Источники» укажем для каждого сегмента соответствующим ему питающий сегмент и интенсивность движения ТС. С теоретической точки зрения сумма интенсивности питающих потоков от предыдущего перекрестка и потоков от второстепенных источников должна быть равна полной интенсивности потока на текущем сегменте, задаваемой в окне «Движение». Крейсерскую скорость на магистрали примем равной 60 км/ч. Результаты заполнения окна «Связи сегментов на перекрестке» для каждого сегмента представлены на рисунке Б.60.

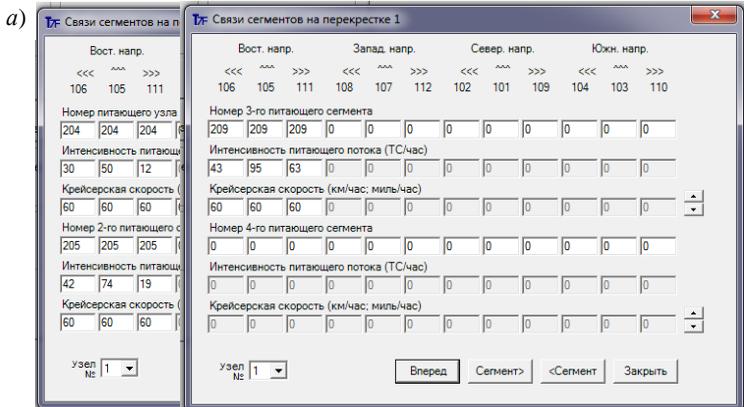


Рисунок Б.60 (начало) – Исходные данные сегментов:

a – № 106, 105, 111



Если связи между сегментами указаны правильно, то узлы на карте соединяются между собой тонкой черной линией.

Восьмой шаг – **создание маршрута беспрепятственного движения**, т. е. создание дороги, для которой необходима координация. На карте необходимо выделить соответствующие узлы и нажать на значок  «Маршрутизация» в левом верхнем углу (рисунок Б.61). После выделения узлы помечаются подсветкой.

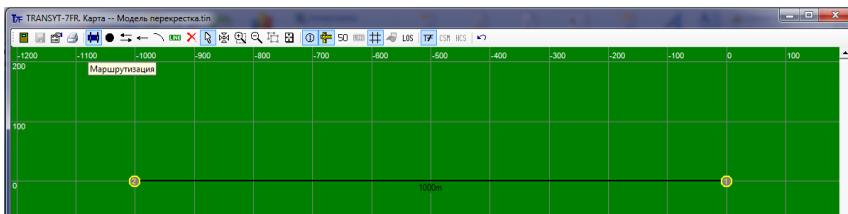


Рисунок Б.61 – Этап создания маршрута беспрепятственного движения

В открывшемся окне (рисунок Б.62) необходимо указать: наименование маршрута, его направление, двухсторонний или односторонний маршрут для беспрепятственного проезда транспорта. Затем нажать «ОК».

Введем следующие данные: наименование маршрута – «Маршрут № 1», маршрут – «Двухсторонний», направление – «Запад».

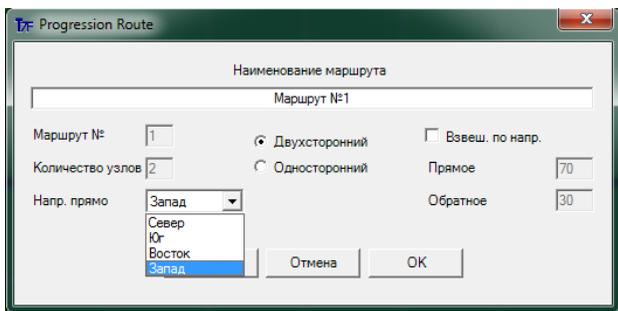


Рисунок Б.62 – Окно «Маршрутизация»

В результате дорога между узлами будет выделена толстой черной линией (см. рисунок Б.61).

Девятый шаг – **параметры расчета** (меню «Правка – Анализ»).

Выполним оптимизацию беспрепятственного движения между двумя закодированными узлами.

В качестве функции оптимизации выбираем «PROS/DI», в качестве показателя невыгодности выберем задержки. Выбор функции «PROS/DI» связан с целью избежать перенасыщения на второстепенных направлениях

и обеспечить более равномерное распределение времени зеленого при оптимизации беспрепятственного движения (PROS), т. е. при данной функции оптимизации системой предпринимается попытка максимизировать возможность беспрепятственного движения, сохраняя при этом достаточную долю времени зеленого сигнала для второстепенных направлений, чего невозможно достичь при выборе обычной функции оптимизации «PROS».

Для проверки правильности создания модели произведем имитацию существующих условий. Окно «Параметры расчета» заполняется аналогично, имитацией существующего цикла. Запустим модель, нажав на значок  «запуститьTransyt-7FR». Если ошибок не выявлено, то на экране появится отчет о текущих транспортных данных.

Показатели эффективности управления дорожным движением для всех узлов представлены на рисунке Б.63.

Десятый шаг – **оптимизация**. Для этого выбираем меню «Правка – Анализ». В появившемся окне «Параметры расчета» выбираем «Оптимизация» и то, что хотим оптимизировать: смещение, длительности фаз и длительность цикла. Для оптимизации цикла используем генетический алгоритм. В качестве минимальной длительности цикла установим 68 с (наибольшая сумма из установленных в окне «Расписание для перекрестка» минимальных длительностей фаз); в качестве максимальной длительности цикла – 120 с.

Отредактированное окно «Параметры расчета», необходимое для оптимизации, представлено на рисунке Б.64.

Модель перекрестка.tif

Все МОЕ даны в единицах в ч.

Системные характеристики :для всех узлов

| Основные показатели | единицы    | Системное значение |
|---------------------|------------|--------------------|
| Полн. пробег        | а-км/ч     | 2952               |
| Время полн. пробега | а-ч/ч      | 111                |
| Полн. слух. з-жка   | а-ч/ч      | 27                 |
| Полн. слух. з-жка   | а-ч/ч      | 35                 |
| Общая з-жка         | а-ч/ч      | 62                 |
| Сред. з-жка         | сек/а      | 43.3               |
| З-жка пассаж.       | рак-а/ч    | 74                 |
| Станд. ост-ки:      | а/ч        | 3622               |
|                     | %          | 71                 |
| Случ. ост-ки:       | а/ч        | 1043               |
|                     | %          | 20                 |
| Полн. ост-ки:       | а/ч        | 4666               |
|                     | %          | 91                 |
| Степ. насыщ. > 1    | # Сегменты | 2                  |
| Удли. см-ди         | # Сегменты | 6                  |
| Время в пробке      | %          | 0                  |
| Длина периода       | сек        | 900                |
| Сист. Ск-ость       | км/ч       | 42.6               |
| Расх. Топл.         | Литр/ч     | 545                |
| Опер. затраты       | \$/ч       | 1019               |
| Индекс невыгодности | DI         | 61.7               |
| значимые PROS       | PROS       | 24.4               |
| Индекс эф-сти       | PROS/DI    | 0.2710             |

Индекс эффективности:      Индекс Невыгодности  
PROS/Индекс невыгодно      з-жка + ост-ки

Рисунок Б.63 – Показатели эффективности

Параметры расчета

Моноцикл  
 мультицикл

По шагам  
 по сегментам

Имитация  
 Оптимизация  
 Оценка

Длит. цикла  
 Послед. фаз  
 Длит. фаз  
 Смещения

Некоординир. сеть

Мин. дл. цикла (с)   
 Исх. дл. цикла (с)   
 Макс. дл. цикла (с)   
 Шаг цикла (с)

Параметры генетического алгоритма  
 Параметры оптимизации фаз

Алг. кратч. спуска  
 Кол-во поколений

Англо-амер. е  
 Метрич. ед

Сокр. отчет  
 Полн. отчет

Исх. расп. 1  
 Исх. расп. 2  
 Игнор. актив.

PROS/DI   
 Задержки

RI   
 DI

Период имитации (мин.)   
 Беспреп. движение (%)   
 Период инициал. (с)   
 Макс. показат. насыщ.   
 Превыш. показат. насыщ.

Инфо      Закрыть

Рисунок Б.64 – Отредактированное окно «Параметры расчета»

Для того чтобы добиться значимых результатов в оптимизации, иногда необходимо подчеркнуть преимущество одного из направлений движения перед другими при помощи весовых коэффициентов. При оптимизации длительностей фаз без привлечения таких коэффициентов иногда приводит

к принижению роли второстепенных направлений. Для исправления этой аномалии можно установить величину «беспрепятственное движение (%)», относительный вес PROS к DI, равный 50 %, что в общем случае несколько понизит вес PROS по отношению к DI. В результате экспериментов и анализа при различных изменениях значений весовых коэффициентов и величины беспрепятственного движения, %, для достижения наилучших результатов максимизации возможности беспрепятственного движения, сохраняя при этом достаточную долю времени зеленого сигнала для второстепенных направлений, следует закодировать в диалоговом окне «Маршрутизация» (доступном из окна карты) весовые коэффициенты для прямого и обратного направлений как «70» и «30» соответственно (рисунок Б.65).

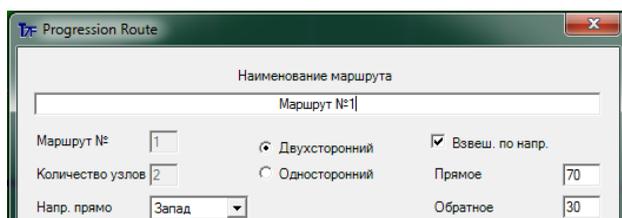


Рисунок Б.65 – Ввод весовых коэффициентов

После создания модели Transyt, выполняется запуск оптимизационного расчета с учетом заданных параметров нажатием на значок . В результате на экране появится окно, где можно просмотреть длительность цикла и длительность фаз («раздел.») для перекрестков до и после оптимизации, просмотреть изменение основных показателей работы сети (рисунок Б.74).

Можно сделать вывод, что в результате оптимизации длительность системного цикла составляет 98 с, для первого узла длительность I фазы составляет 74 с, II фазы – 24 с; для второго узла длительность I фазы составляет 47 с, II фазы – 23 с, III фазы – 28 с.

Расписание для перекрестка Мазурова – Кожара – Бородина начинается с нулевого момента времени, и опорным является интервал № 1. Так как смещение на перекрестке Каменщикова – Мазурова – Огоренко равно 60 с и оно соотносено с опорным интервалом № 4, это означает, что интервал № 4 начинается ровно через 40 с после начала интервала № 1.

Результаты моделирования в виде отчета с текущими транспортными данными представлены на рисунке Б.66.

| Результаты оптимизации (длительность цикла, разделения, и офсет)            |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|------------|------------|
| -----   |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
| узел  | цикл       |            | офсет      |            | фазы С-Ю   |               | фазы В-З      |            |            |
|   | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч.    | нач.оконч.    | нач.оконч. | нач.оконч. |
| 1   | 87         | 98         | 0          | 0          | ---        | ---           | ---           | ---        | ---        |
| 2   | 94         | 98         | 0          | 60         | ---        | ---           | ---           | ---        | ---        |
|   |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
| узел  | раздел.#1  |            | раздел.#2  |            | раздел.#3  |               |               |            |            |
|   | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч. | нач.оконч.    | нач.оконч.    | нач.оконч. | нач.оконч. |
| 1   | 56         | 74         | 31         | 24         |            |               |               |            |            |
| 2   | 35         | 47         | 24         | 23         | 35         | 28            |               |            |            |
|   |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
|   |            |            | задержка   | полное     | расход     | время         | индекс        |            |            |
|   |            |            | управления | к-во       | топлива    | пробега       | эффективности |            |            |
|   |            |            | (сек/авт)  | (%)        | (Лит/час)  | (авт-час/час) |               |            |            |
| Начальное   |            |            | 43.3       | 71         | 545        | 111           | 0.271         |            |            |
| оконча.   |            |            | 22.8       | 60         | 448        | 82            | 1.13          |            |            |
|   |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
| Окончательное решение получено в генерации №47                              |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
| Чтобы получить детальное выходное сообщение необходимо запустить панч-файл: |            |            |            |            |            |               |               |            |            |
| Модель перекрестка.rup  |            |            |            |            |            |               |               |            |            |

Рисунок Б.66 – Результаты оптимизационного расчета

Одиннадцатый шаг – **создание отчета**. Одностраничный форматированный отчет можно получить с помощью команды меню «Вид – Отчет».

Двенадцатый шаг – **графический анализ** безостановочного движения при помощи экрана диаграммы «пространство – время». Данная диаграмма предлагает механизм визуализации возможности безостановочного движения между перекрестками. Экран вызывается щелчком на одноименной кнопке панели инструментов системы или с помощью соответствующей команды меню «Вид».

Результат оптимизации координированного управления в виде диаграммы «пространство – время» представлен на рисунке Б.67.

Расписания на диаграмме ориентированы вертикально, и периодам зеленого и желтого сигналов для главной дороги отвечают участки, окрашенные в зеленый и желтый цвет соответственно. Номера узлов перечислены в круглых белых полях внизу экрана диаграммы.

«Ленты безостановочного движения» (ЛБД) на экране имеют вид штриховых диагональных линий, наклон которых является функцией длины сегмента и крейсерской скорости.

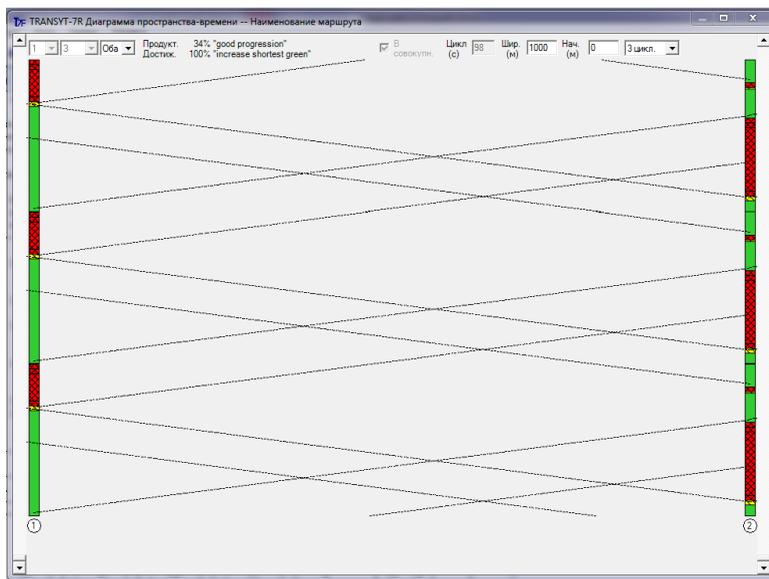


Рисунок Б.67 – Диаграмма «пространство – время» с «лентами безостановочного движения»

Уже на первом перекрестке дороги с беспрепятственным движением можно убедиться, что ЛБД не начинается и не заканчивается точно в моменты включения и выключения зеленого сигнала. ЛБД реально начинается на несколько секунд позже включения зеленого сигнала и заканчивается через несколько секунд после включения желтого (это связано с вводимыми значениями длительностей потерь времени на старте и удлинения эффективного зеленого сигнала).

Расстояние по горизонтали от одного конца маршрута до другого выводится в поле «Ширина». Хотя на экране ширина выглядит постоянной, числовое значение характеризует реальную протяженность маршрута. При необходимости можно редактировать содержимое поля, чтобы изменять масштаб изображения.

По умолчанию начало отсчета располагается в точке с нулевой координатой и соответствует первому слева перекрестку. При необходимости можно использовать ненулевую точку отсчета в поле «Нач.», что приведет к изменению горизонтальных координат всех перекрестков маршрута.

Количество циклов, которое следует отображать на диаграмме, можно выбрать в раскрывающемся списке (от одного до шести циклов).

Экран диаграммы «пространство – время» позволяет визуально определить, достигнут ли достаточный уровень безостановочного движения.

На экране видно, что в оптимизированный сценарий для обоих направлений, вероятно, не самый наилучший вариант организации безостановочного, поскольку ЛБД в прямом направлении прибывает в момент включения зеленого сигнала, а в обратном – до момента включения красного сигнала.

На экране диаграммы «пространство – время» показаны значения критериев продуктивности и достижимости. Критерием продуктивности называется средняя доля цикла, используемая для безостановочного движения (определяется как частное от деления ЛБД на длительность цикла).

Рекомендуются следующие оценки критерия продуктивности, выражающие организацию безостановочного движения: 0,00–0,12 – плохие; 0,13–0,24 – неблагоприятные; 0,25–0,36 – хорошие; 0,37–1,00 – отличные.

Под критерием достижимости понимается средняя доля минимальной продолжительности зеленого в прямом направлении, используемая для безостановочного движения (определяется как частное от деления ЛБД на минимальную длительность зеленого).

Критерий продуктивности составляет 34 % в обоих направлениях, что соответствует хорошим условиям организации беспрепятственного движения, а критерий достижимости достигает 100 %.

При помощи экрана профиля определим факт прибытия групп ТС на зеленый сигнал посредством сравнения профиля интенсивности входного потока с профилем интенсивности потока насыщения, поскольку последний сообщает о порциях зеленого сигнала в цикле для любого отдельного направления. Для этого вначале следует запустить программу Spyglass (с помощью одноименных кнопки панели инструментов или команды меню «Пуск»). В качестве примера в окне «Профиль для перекрестка» перейдем к узлу № 2 и сегменту № 213, который представляет прямое западное направление движения, выберем в раскрывающемся списке профиль «входящий поток (ТС/ч)». На рисунке Б.68 показан профиль входящего потока, из которого следует, что передовая часть группы ТС прибывает к моменту времени 60 с, что соответствует смещению, достаточному, чтобы группа автомобилей успела подъехать к нему со скоростью 60 км/ч и проехать на зеленый сигнал светофора.

Среднее значение PROS для обоих направлений маршрута – 45.

На рисунке Б.68 с помощью диаграммы представлено сравнение результатов расчета для двух связанных перекрестков.

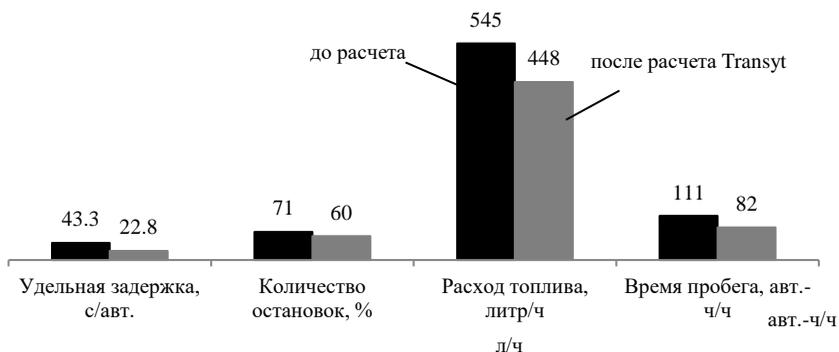


Рисунок Б.69 – Результаты расчета для двух связанных перекрестков так как в качестве критерия оптимизации выбран индекс  $I_{КСЭД}$ , которая позволяет максимизировать возможность беспрепятственного движения, сохраняя при этом достаточную долю времени зеленого сигнала для второстепенных направлений, можно сделать вывод о показателях эффективности управления дорожным движением в сети в целом:

- удельная задержка уменьшилась на 47,3 %;
- количество остановок уменьшилось на 11 %,
  - модельный расход топлива уменьшился на 17,8 % (расход топлива включает топливо, затрачиваемое во время движения по улицам Мазурова и Огоренко, при холостых оборотах и в периоды ускорения и торможения на всём перекрестке в целом);
  - время пробега уменьшилось на 26,1 % (время пробега на внешних сегментах равно полной задержке);
  - средняя системная скорость (по улицам Мазурова и Огоренко) увеличилась на 3,3 %, при этом эксплуатационные затраты уменьшилась на 12,7 %;
  - индекс эффективности увеличился в 4,2 раза;
  - максимальная степень насыщения уменьшилась на 14 % в узле № 1 и на 40 % в узле № 2, максимальная степень насыщения в узле № 1 наблюдается на сегменте № 114 (вход С, перекресток на пересечении улиц Мазурова, Кожара и Бородина) и в узле № 2 на сегменте № 203 (вход В, перекресток на пересечении улиц Каменщикова, Мазурова и Огоренко);
  - максимальная длина очереди уменьшилась на 32,6 % в узле № 1 и уменьшилась на 38,7 % в узле № 2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Whitham, G. B.** *Linear and Nonlinear Waves* / G. B. Whitham. – N.Y. : Wiley, 1974. – 635 p.
- 2 **Whitham, G. B.** *Lectures on Wave Propagation* / G. B. Whitham. – Berlin : Springer, 1979. – 148 p.
- 3 **Payne, H. J.** A critical review of a macroscopic freeway model / H. J. Payne; ed. by W. S. Levine, E. Libermann, S. S. Fearnside // *Research Directions in Computer Control of Urban Traffic System*. – N.Y.: Amer. Society of Civil Engineers. – 1979. – P. 251–265.
- 4 **Payne, H. J.** FREFLO. Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic / H. J. Payne // *Transp. Res. Rec.* – 1979. – Vol. 722. – P. 68–77.
- 5 **Papageorgiou, M.** Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control / M. Papageorgiou. – Berlin : Springer, 1983. – 83 p.
- 6 **Cremer, M.** Traffic prediction and optimization using an efficient macroscopic simulation tool / M. Cremer // *Modelling and Simulation 1993* / ed. A. Pave; Soc. Comput. Simulation Int. – Ghent, 1993. – P. 515–519.
- 7 **Cremer, M.** Parameter identification for a traffic flow model / M. Cremer, M. Papageorgiou // *Automatica*. – 1981. – Vol. 17. – P. 837–843.
- 8 **Rathi, A. K.** Enhanced FREFLO / A. K. Rathi, E. B. Lieberman, M. Yedlin // *Modeling of congested environments* // *Transp. Res. Rec.* – 1987. – Vol. 1112. – P. 61–71.
- 9 **Phillips, W. F.** A kinetic model for traffic flow with continuum implications / W. F. Phillips // *Transp. Plan. Technol.* – 1979. – Vol. 5. – P. 131–138.
- 10 **Phillips, W. F.** A new continuum traffic model obtained from kinetic theory / W. F. Phillips // *Proc. 1978 IEEE. Conf. Decision and Control*. – N.Y.: IEEE. – 1979. – P. 1032–1036.
- 11 **Kuhne, R. D.** Macroscopic freeway model for dense traffic : stop-start waves and incident detection / R. D. Kuhne // *Transport and Traffic Theory* : Proc. 9th Int. Sympos / ed. by R. Hamerslag – Utrecht: VNU Science, 1984. – P. 21–42.
- 12 **Kuhne, R. D.** Freeway speed distribution and acceleration noise Calculations from stochastic continuum theory and comparison with measurements / R. D. Kuhne // *Transport and Traffic Theory* : Proc. 10th Int. Sympos / ed. N. H. Gartner – N.Y. : Elsevier, 1987. – P. 119–137.
- 13 **Kerner, B. S.** Cluster effect in initially homogeneous traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhäuser // *Phys. Rev. E*. – 1993. – Vol. 48. – P. R2335–R2338.
- 14 **Kerner, B. S.** Structure and parameters of clusters in traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhäuser // *Phys. Rev. E*. – 1994. – Vol. 50. – P. 54–83.
- 15 **Kerner, B. S.** Deterministic spontaneous appearance of traffic jams in slightly inhomogeneous traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhäuser, M. Schilke // *Phys. Rev.* – 1995. – Vol. 51, is. 6. – P. R6243–R6246.

16 **Kerner, B. S.** Formation of traffic jams caused by fluctuations and random processes in traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhäuser, M. Schilke // Proc. 7th World Conf. Transport Res. ed. D. Hensher. – Vol. 2. – Oxford : Pergamon. – 1995. – P. 167–182.

17 **Kerner, B. S.** ‘Dipole-layer’ effect in dense traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhäuser, M. Schilke // Phys. Lett. A. – 1996. – Vol. 215. – P. 45–56.

18 **Paveri-Fontana, S. L.** On Boltzmann-like treatments for traffic flow: A critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis / S. L. Paveri-Fontana // Transp. Res. – 1975. – Vol. 9. – P. 225–235.

19 **Daganzo, C. F.** Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow / C. F. Daganzo // Transp. Res. – 1995. – Vol. 29. – P. 277–286.

20 **Helbing, D.** Improved fluid-dynamic model for vehicular traffic / D. Helbing // Phys. Rev. – 1995. – Vol. 51. – P. 3164–3169.

21 **Alberti, E.** Contributions to the Boltzmann-like approach for traffic flow A model for concentration dependent driving programs / E. Alberti, G. Belli // Transp. Res. – 1978. – Vol. 12. – P. 33–42.

22 **Andrews, F. C.** A statistical theory of traffic flow on highways II. Three-car interactions and the onset of queuing / F. C. Andrews // Transp. Res. – 1970. – Vol. 4. – P. 367–377.

23 **Beylich, A. E.** Elements of a kinetic theory of traffic flow / A. E. Beylich // Rarefied Gas Dynamics / ed. by R. Campargue. – Vol. 1. – Paris : Commissariat al’Energie Atomique. – 1979. – P. 129–138.

24 **Lampis, M.** On the kinetic theory of traffic flow in the case of a non negligible number of queueing vehicles / M. Lampis // Transp. Sci. – 1978. – Vol. 12. – P. 16–28.

25 **Nagel, K.** Deterministic models for traffic jams / K. Nagel, H. J. Herrmann // Physica A. – 1993. – Vol. 199. – P. 254–269.

26 **Helbing, D.** Derivation and empirical validation of a refined traffic flow model / D. Helbing // Physica A. – 1996. – Vol. 233. – P. 253–282.

27 **Helbing, D.** Verkehrsdynamik / D. Helbing. – Berlin : Springer. – 1997. – 393 p.

28 **Helbing, D.** Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition / D. Helbing, M. Treiber // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – P. 3042–3045.

29 **MASTER:** Macroscopic traffic simulation based on a gas-kinetic, non-local traffic model / D. Helbing [et al.] // Transp. Res. B. – 2001. – Vol. 35. – P. 183–211.

30 **Shvetsov, V. I.** Macroscopic dynamics of multilane traffic / V. I. Shvetsov, D. Helbing // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 59. – P. 6328–6339.

31 **Hoogendoorn, S.** Gas-kinetic model for multi-lane heterogeneous traffic flow / S. Hoogendoorn, P. H. Bovy // Transp. Res. Rec. – 1999. – Vol. 1678. – P. 150–159.

32 **Sparmann, U.** Spurwechselvorgaenge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Bonn – Bad Godesberg / U. Sparmann // Bundesministerium für Verkehr, Abt. Strassenbau. – 1978. – 33 p.

33 **Nelson, P.** A kinetic model of vehicular traffic and its associated bimodal equilibrium solutions / P. Nelson // Transp. Theor. Stat. Phys. – 1995. – Vol. 24. – P. 383–409.

34 **Wegener, R.** A kinetic model for vehicular traffic derived from a stochastic microscopic model / R. Wegener, A. Klar // Transp. Theor. Stat. Phys. – 1996. – Vol. 25. – P. 785–798.

35 **Klar, A.** Enskog-like kinetic models for vehicular traffic / A. Klar, R. Wegener // J. Stat. Phys. – 1997. – Vol. 87. – P. 91–114.

- 36 **Pipes, L. A.** An operational analysis of traffic dynamics / L. A. Pipes // *J. Appl. Phys.* – 1953. – Vol. 24. – P. 274–281.
- 37 **Chandler, R. E.** Traffic dynamics: Studies in carfollowing / R. E. Chandler, R. Herman, E. W. Montroll // *Oper. Res.* – 1958. – Vol. 6. – P. 165–184.
- 38 **Gazis, D. C.** Nonlinear follow the leader models of traffic flow / D. C. Gazis, R. Herman, R. W. Rothery // *Oper. Res.* – 1961. – Vol. 9. – P. 545–567.
- 39 **May, Jr. A. D.** Non-integer car-following models / Jr. A. D. May, H. E. M. Keller // *Highway Res. Rec.* – 1967. – Vol. 199. – P. 19–32.
- 40 **Kuhne, R. D.** Knowledge-based optimization of line control systems for free-ways / R. D. Kuhne, A. Kroen // *Int. Conf. Artificial Intelligence Appl. Transportation Engineering.* – San-Buenaventura, California, June 20–24. – 1992. – P. 173–192.
- 41 **Kuhne, R. D.** Macroscopic simulation model for freeway traffic with jams and stop-start waves / R. D. Kuhne, M. B. Rodiger // *Proc. 1991 Winter Simulation Conf.* / ed. by B. L. Nelson. – Phoenix, Arizona: Society for Comput. Simul. Int. – 1991. – P. 762–770.
- 42 **Brackstone, M.** Car following: A historical review / M. Brackstone, M. McDonald // *Transp. Res. F.* – 2000. – Vol. 2. – P. 181–196.
- 43 **Newell, G. F.** Nonlinear effects in the dynamics of car following / G. F. Newell // *Transp. Res.* – 1961. – Vol. 9. – P. 209–229.
- 44 Structure stability of congestion in traffic dynamics / M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama // *Jpn. J. Industr. Appl. Math.* – 1994. – Vol. 11. – P. 203–223.
- 45 Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation / M. Bando [et al.] // *Phys. Rev.* – 1995. – Vol. 51. – P. 1035–1042.
- 46 **Bando, M.** Analysis of optimal velocity model with explicit delay / M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama // *Phys. Rev.* – 1998. – Vol. 58. – P. 5429–5435.
- 47 Analytical results for the steady state of traffic flow models with stochastic delay / B.-H. Wang [et al.] // *Phys. Rev.* – 1998. – Vol. 58. – P. 2876–2882.
- 48 **Gipps, P. G.** A behavioural car following model for computer simulation / P. G. Gipps // *Transp. Res.* – 1981. – Vol. 15. – P. 105–111.
- 49 **Krau, S.** Continuous limit of the nagel-schreckenberg model / S. Krau, P. Wagner, C. Gawron // *Phys. Rev.* – 1996. – Vol. 54. – P. 3707–3712.
- 50 **Krau, S.** Metastable states in a microscopic model of traffic flow / S. Krau, P. Wagner, C. Gawron // *Phys. Rev.* – 1997. – Vol. 55. – P. 5597–5602.
- 51 **Bleile, T.** Traffic simulation supporting urban control system development / T. Bleile // *Intelligent Transport Systems : proc. of the 4th world Congress.* – Brussels : ITS Congr. Association, 1997. – 18 p.
- 52 **Helbing, D.** Generalized force model of traffic dynamics / D. Helbing, B. Tilch // *Phys. Rev.* – 1998. – Vol. 58. – P. 133–138.
- 53 **Kerner, B. S.** Structure and parameters of clusters in traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhauser // *Phys. Rev.* – 1994. – Vol. 50. – P. 54–83.
- 54 **Treiber, M.** Explanation of observed features of self-organization in traffic flow : e-print condmat. / M. Treiber, D. Helbing. – 1999. – 4 p.
- 55 **Treiber, M.** Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // *Phys. Rev.* – 2000. – Vol. 62. – P. 1805–1824.

56 **Esser, J.** Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata / J. Esser, M. Schreckenberg // *Int. J. Mod. Phys. C.* – 1997. – Vol. 8. – P. 1025–1036.

57 **Prigogine, I.** A Boltzman-like approach for traffic flow / I. Prigogine, F.C. Andrews // *Operations Research.* – 1960. – Vol. 8. – P. 789–797.

58 Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений : учеб. пособие / И. В. Максимей [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 150 с.

59 **Галушко, В. Н.** Метод и средства имитационного моделирования динамики организации обслуживания пассажиропотоков городским транспортом / В. Н. Галушко : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 18 с.

60 Оптимизационный пакет регулирования ДД Transyt 7FR. [Электронный ресурс] /AGA Group Inc. – Режим доступа : <http://www.againc.net/ru/production/its/programs/Transyt>. – Дата доступа : 23.01.2015.

61 Transyt-7FR. [Электронный ресурс] / BIARUM. – Режим доступа : [http://www.biarum.com/wp-content/uploads/2011/06/tran\\_prez1.pdf](http://www.biarum.com/wp-content/uploads/2011/06/tran_prez1.pdf). – Дата доступа : 19.03.2015.

62 Quadstone Paramics [Электронный ресурс] / Paramics. – Режим доступа : <http://www.paramics-online.com>. – Дата доступа : 21.08.2016.

63 Программный комплекс ArteryLite [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.arterylite.ru/kratkoe-opisanie-optimizatsion-nyih-protsedur-arterylite>. – Дата доступа : 22.08.2016.

64 Программный комплекс VISSIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ptv-vision.ru/produkty/vissim>. – Дата доступа : 23.08.2016.

65 Светофорное регулирование LISA+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://apluss.ru>. – Дата доступа : 24.08.2016.

66 Дорожный менеджер [Электронный ресурс] / Mallenom systems. – Режим доступа : <http://www.mallenom.ru/products/modelirovanie-i-iskusstven-ny-intelekt/dorozh-nyi-menedzher>. – Дата доступа : 24.08.2016.

67 **Врубель, Ю. А.** Методические указания к курсовому проектированию для студентов специальности «Организация дорожного движения» / Ю. А. Врубель. – Минск : БНТУ, 1999. – 49 с.

68 **Аземша, С. А.** Решение актуальных задач дорожного движения в г. Гомеле программными средствами транспортного моделирования / С. А. Аземша, В. Н. Галушко, Ю. Н. Канек // *Вестник БелГУТа: Наука и транспорт.* – 2015. – № 2 (30). – С. 38–41.

69 Transportation laboratory of istu [Электронный ресурс] / Светофор. – Режим доступа : <http://transport.istu.edu/technologies/programms.htm>. – Дата доступа : 27.08.2016.

70 Многоподходное имитационное моделирование [Электронный ресурс] / AnyLogic. – Режим доступа : <http://www.anylogic.ru>. – Дата доступа : 28.08.2016.

71 Многоподходное имитационное моделирование [Электронный ресурс] / AnyLogic. – Режим доступа : [http://www.anylogic.ru/blog?page=post&blog=blog\\_RU&id=387](http://www.anylogic.ru/blog?page=post&blog=blog_RU&id=387). – Дата доступа : 28.08.2016.

72 Многоподходное имитационное моделирование [Электронный ресурс] / AnyLogic. – Режим доступа : [http://www.anylogic.ru/blog?page=post&blog=blog\\_RU&id=96](http://www.anylogic.ru/blog?page=post&blog=blog_RU&id=96). – Дата доступа : 28.08.2016.

73 DeskTran [Электронный ресурс] / AGA Group Inc. – Режим доступа : <http://www.againc.net/ru/production/its/programms/desktran>. – Дата доступа : 29.08.2016.

74 Dynamic route assignment combining guser learning and microsimulation. [Electronic resource] / ITS – GomeI, 2016. – Mod of access : <http://www.its.leeds.ac.uk/software/dracula>. – Dat of access : 30.08.2016.

75 Пакет имитационного моделирования Aimsun [Электронный ресурс] / AGA Group Inc. – Режим доступа : <http://www.againc.net/ru/production/its/programms/aimsun>. – Дата доступа : 31.08.2016.

76 **Бекмагамбетов, М. М.** Анализ современных программных средств транспортного моделирования / М. М. Бекмагамбетов, А. В. Кочетков // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6 (77). – С. 25–34.

77 Управление транспортными потоками на локальных перекрестках [Электронный ресурс] / ITSGIS. – Режим доступа : <http://ppt-online.org/55022>. – Дата доступа : 5.09.2016.

78 Сервис отображения дорожных объектов на веб-картах / С. Ф. Маслович [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2015. – № 2 (30). – С. 38–41.

79 Grid Smart Public [Electronic resource] / GridSmart®. – GomeI, 2016. – Mod of access : <https://www.youtube.com/user/AldisGridSmart/featured>, <http://userguide.grid-smartcloud.com/index.html>. – Dat of access : 15.09.2016.

80 Исходная информация об объекте оптимизации. Первичная обработка и анализ транспортных данных. [Электронный ресурс] / ArteryLite. – Гомель, 2016. – Режим доступа : <http://www.arterylite.ru/2-4-ishodnaya-informatsiya-ob-obekte-optimiza-tsii-pervichnaya-obrabotka-i-analiz-transportnyih-dannyih>. – Дата доступа : 15.09.2016.

81 Clip for Automotive Glass [Электронный ресурс] / Регистрация патентов. – Гомель, 2016. – Режим доступа : [http://www.findpatent.ru/img\\_show/8250989.html](http://www.findpatent.ru/img_show/8250989.html). – Дата доступа : 15.09.2016.

82 **Папков, Б. В.** Надежность и эффективность электроснабжения : учеб. пособие / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. – Уфа : Уфимс. гос. авиац. техн. ун-т, 2005. – 380 с.

83 **Капский, Д. В.** Метод конфликтных зон прогнозирования дорожно-транспортной аварийности по потенциальной опасности / Д. В. Капский. – М. : Новое знание, 2015. – 372 с.

84 Анализ статистических данных на персональном компьютере : лаб. практ. / Т. В. Прищепова [и др.] ; под ред. В. С. Серёгиной. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 95 с.

85 **Kerner, B. S.** Introduction to modern traffic flow theory and control. The long road to three – phase traffic theory / B. S. Kerner. – Berlin: Springer, 2009. – P. 143–144.

86 **Garther, N. H.** Traffic flow theory : Astate of the artreport / N. H. Garther, C. J. Messer, A. K. Rathi // Transportation Research Board. – Washington DC, 2001. – 125 p.

87 **Уизем, Дж.** Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. – М. : Мир, 1977. – 624 с.

88 **Иносэ, Х.** Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада. – М. : Транспорт, 1983. – С. 248.

89 **Багдоев, А. Г.** Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах / А. Г. Багдоев, В. И. Ерофеев, А. В. Шекоян. – М. : Физматлит, 2009. – 320 с.

90 **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978. – 420 с.

91 **Treiber, M.** Congested traffic states inempirical observation sand microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, Helbingd // Phys. Rev. E. – 2000. – Vol. 62. – P. 1805–1824.

92 **Журкин, И. Г.** Геоинформационные системы / И. Г. Журкин, С. В. Шайгура. – М : Кудиц-пресс, 2009. – 272 с.

93 О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах» : постановление правительства Российской Федерации от 3 октября 2013 г. № 864/ Консультант Плюс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_152847](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152847). – Дата доступа : 24.12.2016.

94 Автомобильные перевозки и организация дорожного движения : справ. / пер. с англ. В. У. Рэнкин [и др.]. – М. : Транспорт, 1981. – 592 с.

95 **Бабков, В. Ф.** Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. – М. : Транспорт, 1993. – 271 с.

96 Методические рекомендации по назначению мероприятий для повышения безопасности движения на участках концентрации дорожно-транспортных происшествий/ Росавтодор (Российское дорожное агентство) от 30.03.2000 г. – М. : Информавтодор, 2000. – 63 с.

97 Рекомендации по обеспечению безопасности дорожного движения на участках концентрации ДТП на автомобильных дорогах общего пользования: утв. приказом Комитета по автомобильным дорогам М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь № 43 от 27.03.01 г. – 54 с.

98 **Шевченко, Д. Н.** Теория вероятностей и математическая статистика / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 318 с.

99 **Боровиков, В. П.** Популярное введение в программу STATISTICA / В. П. Боровиков. – М. : Компьютер Пресс, 1998. – 69 с.

100 **Вентцель, Е. С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1988. – 206 с.

101 **Федоров, В. В.** Теория оптимального эксперимента / В. В. Федоров.– М. : Наука, 1971. – 270 с.

Учебное издание

Галушко *Виктор Николаевич*  
Аземша *Сергей Александрович*  
Капский *Денис Васильевич и др.*

## ОПТИМИЗАЦИЯ В ДОРОЖНОМ ДВИЖЕНИИ

Учебно-методическое пособие

Редактор А. А. П а в л ю ч е н к о в а  
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать . . . 2021 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 10,70. Уч.-изд. л. 10,29. Тираж 70 экз.  
Зак. № . . . Изд. № 57.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014 г.  
№ 2 /104 от 01.04.2014 г.  
№ 3 /1583 от 14.11.2017 г.  
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель