

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Тракторы»

Ю. Е. Атаманов
В. Н. Плищ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И АВТОНОМНОГО
ТРАНСПОРТА. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 05
«Электрический и автономный транспорт»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2022

УДК 629.43.015/.017(075.8)

ББК 39.83я7

А92

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Тракторы и автомобили» БГАТУ,
зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *Г. И. Гедройт*;
зам. начальника УКЭР-1 по серийному производству ОАО «МТЗ»
В. Г. Ермаленок

Атаманов, Ю. Е.

А92 Теория электрического и автономного транспорта. Общая характеристика : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт» / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ. – Минск : БНТУ, 2022. – 180 с.
ISBN 978-985-550-802-2.

В настоящем учебно-методическом пособии представлен теоретический курс по дисциплине «Теория электрического и автономного транспорта». В нем изложены разделы дисциплины, посвященные современному электрическому и автономному транспорту и его преимуществу перед автомобильным транспортом с двигателями внутреннего сгорания, тенденциям развития беспилотного автономного транспорта, взаимодействию электрического подвижного состава и системы электроснабжения, особенностям городских улиц и дорог, свойствам рельсового пути. Изложены основные нормативные требования к электрическому и автономному транспорту по удобству и безопасности пассажирских перевозок и перевозки грузов.

УДК 629.43.015/.017(075.8)

ББК 39.83я7

ISBN 978-985-550-802-2

© Атаманов Ю. Е., Плищ В. Н., 2022

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

С о д е р ж а н и е

Введение.....	5
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА	33
1.1. Общественный транспорт в современном городе	33
1.2. Требования к городскому транспорту. Классификация	37
1.3. Оценочные показатели городского электрического транспорта	40
1.3.1. Массовые характеристики подвижного состава	41
1.3.2. Габариты и полезная площадь салона	43
1.3.3. Расход электрической энергии	54
1.3.4. Технические показатели городского пассажирского транспорта.....	57
1.4. Комфортабельность и безопасность подвижного состава.....	62
1.4.1. Основные понятия и определения	62
1.4.2. Шум и вибрации	63
1.4.3. Удобства поездки, входа и выхода пассажиров	65
1.4.4. Микроклимат пассажирского салона	67
1.4.5. Обзорность и освещенность салона	69
1.4.6. Безопасность	71
Контрольные вопросы.....	73
2. ГОРОДСКИЕ ДОРОГИ И РЕЛЬСОВЫЕ ПУТИ.....	75
2.1. Классификация и элементы городских улиц и дорог	75
2.2. Неровности дорог	84
2.3. Рельсовый путь и его элементы	94
2.3.1. Основные понятия и определения	94
2.3.2. Динамические характеристики верхнего строения пути	98
2.3.3. Рельсы	101
2.3.4. Шпалы	103
2.3.5. Стыковые и промежуточные скрепления	104
2.3.6. Балластный слой	106
2.3.7. Основная площадка земляного полотна	107
2.3.8. Стрелочные переводы	109
2.3.9. Дорожное покрытие трамвайных путей	113

<i>2.3.10. Неровности рельсового пути</i>	114
<i>2.3.11. Переходные кривые автомобильных дорог и трамвайных путей</i>	118
Контрольные вопросы.....	139
3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	141
3.1. Общие сведения о системе электроснабжения	141
3.2. Схемы внешнего и внутреннего электроснабжения	142
3.3. Особенности работы тяговых сетей.....	144
3.4. Контактные подвески.....	146
3.5. Взаимодействие контактных подвесок и токоприемников.....	149
3.6. Связь режимов работы подвижного состава и системы электроснабжения	153
Контрольные вопросы.....	156
ЛИТЕРАТУРА	158
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	159
ПРИЛОЖЕНИЕ	161

Введение

Теория электрического и автономного транспорта (ТЭиАТ) – наука о функциональных свойствах подвижного состава электрического транспорта (ПС ЭТ), зависимостях этих свойств от конструктивных параметров подвижного состава, закономерностях движения подвижного состава, об эффективных и безопасных режимах движения в заданных условиях эксплуатации.

Теория электрического и автономного транспорта является одной из базовых дисциплин, которые определяют профессиональный фундамент знаний инженера-электромеханика по специальности «Электрический и автономный транспорт». Ее изучение базируется на знаниях и навыках, полученных при изучении физики, математики, информатики, теоретической механики, устройства (конструкции) подвижного состава электрического транспорта.

Цель данного учебно-методического пособия – дать студентам знания по выбору конструктивных параметров подвижного состава (электробус, троллейбус, электромобиль, трамвай) электрического транспорта, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства, которые связаны с перевозкой пассажиров и грузов в различных условиях. В нем рассматриваются вопросы общей динамики подвижного состава при взаимодействии с внешней средой и на этой основе в дальнейшем изучаются важнейшие эксплуатационные свойства подвижного состава: тягово-скоростные, тормозные, криволинейное движение, устойчивость, колебания подвижного состава и проходимость. Изучив дисциплину «Теория электрического и автономного транспорта», выполнив лабораторные и практические работы, а так же курсовую работу, студент должен уметь:

- выполнять исследования на механико-математических моделях и проводить анализ результатов моделирования заданного эксплуатационного свойства подвижного состава;

- выбирать конструктивные параметры подвижного состава, обеспечивающие нормативные или заданные показатели его эксплуатационных свойств;

- оценивать эксплуатационные свойства подвижного состава в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ) и нормативами.

Под *подвижным составом электрического транспорта* в данном учебно-методическом пособии подразумевается наземный без-

рельсовый и рельсовый электрический транспорт. Для оценки *технико-экономических показателей* подвижного состава электрического транспорта используются следующие критерии:

- пассажировместимость (вместимость);
- снаряженная масса;
- удельная снаряженная масса;
- полная масса;
- система управления тяговым электродвигателем;
- тип дверей и их количество;
- максимальная скорость движения;
- мощность тягового электродвигателя;
- удельная мощность;
- расход электрической энергии;
- стоимость подвижного состава.

Электробус (электрический автобус) – безрельсовое механическое средство общего пользования с электрическим приводом, которое питается от независимого источника электроэнергии (аккумуляторов, топливных элементов, конденсаторов и т. п.), предназначенное для перевозки пассажиров по дорогам и по установленному маршруту.

Электромобиль – автомобиль, приводимый в движение одним или несколькими электродвигателями с питанием от независимого источника электроэнергии (аккумуляторов, топливных элементов, конденсаторов и т. п.). Различают легковой электромобиль для перевозки пассажиров и грузовой электромобиль для перевозки различных грузов.

Троллейбус – дорожное транспортное средство, предназначенное для перевозки пассажиров и их багажа, приводимое в движение тяговым электрическим двигателем, питание которого обеспечивается по подвесной контактной сети от внешнего источника электрического тока [1].

Сочлененный троллейбус – троллейбус, состоящий из двух или более жестких шарнирно-соединенных между собой секций так, что обеспечивается перемещение пассажиров из одной секции в другую [1].

Ток для питания тягового электродвигателя троллейбуса поступает от подвесной контактной сети (троллей), имеющей два провода, через подвижные токоприемные устройства со скользящим контактом. Троллейбус движется по установленным маршрутам.

Трамвай – механическое транспортное средство, предназначенное для движения по рельсам, участвующее в дорожном движении и не являющееся железнодорожным транспортным средством [2].

Сочлененный трамвай – трамвай, состоящий из двух или более жестких шарнирно-соединенных между собой секций так, что обеспечивается перемещение пассажиров из одной секции в другую [2].

Трамвайный поезд – трамвай, соединенный с помощью сцепного устройства с одним или несколькими трамвайными вагонами, работающими по системе многих единиц [2].

Питание тяговых электродвигателей трамвая осуществляется постоянным током от подвесной однопроводной контактной сети через подвижное токоприемное устройство со скользящим контактом. Вторым проводом являются рельсы.

Ниже приведены технические характеристики и внешний вид (дизайн) некоторых моделей троллейбусов и трамваев (рис. 1, 2).

Модель 321



Пассажировместимость 115 человек
Масса снаряженного троллейбуса 11100/11400 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 60 км/ч
Тяговый электродвигатель 8МЛ 3550 к/4 / ДК 211 БМ
Мощность 185/170 кВт
Система управления транзисторная
Количество дверей 3
Тип дверей двухстворчатые, поворотносдвижные
Количество мест для сидения 26

СВАРЗ–6235



Пассажировместимость 100 человек
Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
Двигатель ТАД-3
Мощность 180 кВт
Система управления транзисторная
Количество дверей для пассажиров 3
Мест для сидения 25+1

Рис. 1. Дизайн и краткие технические характеристики некоторых моделей двухосных троллейбусов

BM3-5298.01



Пассажировместимость 100 человек
Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 70 км/ч
Двигатель ТАД-280
Мощность 180 кВт
Система управления транзисторная
Количество дверей для пассажиров 3
Габаритные размеры:
Длина 12950 мм
Ширина 2530 мм
Высота по крыше 3370 мм
Мест для сидения 28

Skoda 24 Tr Irisbus



Пассажировместимость 86 человек
Масса снаряженного троллейбуса 11990 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
Двигатель Skoda Electric
Мощность 210 кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Количество дверей для пассажиров 3
Габаритные размеры:
Длина 11990 мм
Ширина 2550 мм
Высота по крыше 3500 мм
Мест для сидения 28

ЛАЗ-Е183



Пассажировместимость 120 человек
Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 75 км/ч
Двигатель ЭД-139АУ2
Мощность 140 (170) кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Количество дверей для пассажиров 3
Мест для сидения 24-36

Продолжение рис. 1

Модель 42003А



Пассажировместимость 115 человек
Масса снаряженного троллейбуса 12600 кг
Максимальная техническая масса 18000 кг
Максимальная установившаяся скорость 50 км/ч
Тяговый электродвигатель SKODA ML 3550, переменного тока
Мощность 185 кВт
Система управления транзисторная
Количество дверей 2
Тип дверей двухстворчатые, поворотнo-сдвижные
Габаритные размеры:
Длина (по кузову) 12300 мм
Ширина (по кузову) 2500 мм
Высота 3640 мм
Количество мест для сидения 29+5

Окончание рис. 1

71-153



Пассажировместимость 165 человек
Масса снаряженного вагона 19500 кг
Конструкционная скорость не менее 75 км/ч
Тяговый электродвигатель асинхронный
Мощность 4×55 кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Расход электроэнергии не более 80 Вт час/т.км
Количество дверей для пассажиров 2
Габаритные размеры:
Длина вагона (по кузову) 15000 мм
Ширина вагона (по кузову) 2500 мм
Высота вагона 3150 мм
Количество мест для сидения 28

Татра



Пассажировместимость 163 человека
Масса снаряженного вагона 16800 кг
Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
Тип двигателя ТЕ 022
Мощность двигателя 4×40 кВт
Расход электроэнергии не более 80 Вт час/т.км
Количество дверей 2
Габаритные размеры:
Длина кузова 14000 мм
Ширина кузова 2500 мм
Высота вагона 3050 мм
Мест сидячих 23

Рис. 2. Дизайн и краткие технические характеристики некоторых моделей четырехосных трамваев

ЛТ-10



Пассажироместимость 90..180 человек
Масса снаряженного вагона 23000 кг
Максимальная установившаяся скорость
75 км/ч
Мощность тяговых электродвигателей
4×65 кВт
Система управления тиристорно-импульсная
Расход электроэнергии не более 80 Вт час/т.км
Количество дверей 4
Габаритные размеры:
Длина вагона 16500
Ширина кузова вагона 2520
Высота кузова 3100
Высота кузова с электрооборудованием 3700
Количество мест для сидений 34

71-402 «Спектр»



Пассажироместимость 168 человек
Масса снаряженного вагона 19600 кг
Максимальная установившаяся скорость
62 км/ч
Тяговый электродвигатель асинхронный
Мощность 4 х 54 кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Расход электроэнергии не более 80 Вт час/т.км
Количество дверей для пассажиров 3
Габаритные размеры:
Длина 15290 мм
Ширина 2500 мм
Высота по крыше 3050 мм
Количество мест для сидения 32

КТМ-5



Пассажироместимость 224 человека
Масса снаряженного вагона 18650 кг
Максимальная установившаяся скорость
75 км/ч
Тяговый электродвигатель ДК-259
Мощность 4×45 кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Расход электроэнергии (летом) 2 кВт·ч/км
Расход электроэнергии (зимой) 3 кВт·ч/км
Количество дверей для пассажиров 3
Габаритные размеры:
Длина 15094 мм
Ширина 2550 мм
Высота по крыше 3128 мм
Мест для сидения 32

Продолжение рис. 2

60102



Пассажироместимость 224 человека
Масса снаряженного вагона 18650 кг
Максимальная установившаяся скорость
75 км/ч
Тяговый электродвигатель ДК-259
Мощность 4×45 кВт
Система управления на IGBT транзисторах
Расход электроэнергии (летом) 2 кВт·ч/км
Расход электроэнергии (зимой) 3 кВт·ч/км
Количество дверей для пассажиров 3
Габаритные размеры:
Длина 15094 мм
Ширина 2550 мм
Высота по крыше 3128 мм
Мест для сидения 32

Окончание рис. 2

Трамвай характеризуется невысокой скоростью движения, создает помехи движению остального транспорта на перекрестках и задержки у остановочных пунктов при нешироких улицах, создает повышенный шум. Посадка и высадка пассажиров связана с переходом ими проезжей части улицы при отсутствии специальных подземных переходов, что снижает безопасность трамвайного транспорта. В основном по этим причинам его переносят из центра на окраины города.

Наиболее распространенный тип современного трамвая – четырехосный вагон с полуавтоматической или автоматической системой управления движением и максимально электрифицированным оборудованием вспомогательных систем. При создании новых типов вагонов стремятся к предельному снижению их весовых показателей путем широкого применения легированных сталей, легких сплавов, профильного проката как для несущих элементов конструкции вагона, так и для внутренней и внешней отделки.

В настоящее время трамвай развивается на новой основе – как скоростной трамвай, отличающийся от обычного почти полным отделением его от остального городского транспорта на обособленном рельсовом пути. Скоростной трамвай теперь рассматривается как новый вид городского пассажирского транспорта, хотя по своим конструктивным особенностям он близок к обычному трамваю. Разница состоит лишь в том, что линии скоростного трамвая прокладывают

в перегруженных центрах городов под землей, а в остальных местах – на эстакадах или на огороженном обособленном полотне с пересечением улиц преимущественно в разных уровнях. Это позволяет упорядочить движение трамвая, ликвидировать его мешающее влияние на остальной транспорт и повысить скорость сообщения.

В странах дальнего зарубежья к середине 60-х годов XX столетия троллейбусы начали интенсивно вытесняться автобусами, производство которых из-за низких цен на нефть и моторное топливо стремительно росло. В связи с этим во многих странах производство троллейбусов прекратилось, а контактные линии были демонтированы. Троллейбусное движение сохранилось в таких странах как Швейцария, Чехия, Италия, Франция, страны СНГ и др. Однако в конце 70-х годов XX столетия в связи с возросшими ценами на нефть, изменением климата и особенно интенсивным загрязнением атмосферы крупных городов отработанными газами автомобилей и автобусов началось возрождение троллейбусного движения. Так, легковой автомобиль при среднегодовом пробеге 15 тыс. км выбрасывает в атмосферу 3,25 т углекислого газа, 0,8 т оксида углерода, 0,2 т углеводов, 0,04 т оксидов азота, при этом «потребляет» 4,35 т кислорода. В отличие от промышленных предприятий и тепловых электростанций, выброс которых концентрируется в определенной зоне, автомобили рассеивают продукты неполного сгорания топлива практически по всей территории городов, причем непосредственно в приземном слое атмосферы. Например, по данным Республиканского научно-исследовательского унитарного предприятия «Бел НИЦ "Экология"» информация об объемах выбросов в атмосферу от автомобильного транспорта с 2014 по 2019 годы представлена в табл. 1.

Таблица 1

Объем выбросов от автомобильного транспорта в атмосферу по областям Республики Беларусь (тыс. тонн)

Регион	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Брестская область	87,6	78,6	79,6	76,8	79,5	82,9
Витебская область	68,7	59,9	57,9	51,0	49,2	51,0
Гомельская область	71,1	66,3	66,6	60,1	59,0	57,9
Гродненская область	74,1	67,2	65,7	63,3	63,4	63,8

Регион	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Минск	146,0	111,2	107,7	120,6	120,1	115,5
Минская область	138,2	141,8	146,2	140,2	140,7	138,0
Могилевская область	58,0	55,1	53,9	51,9	50,6	48,5

Как можно заметить по данным таблицы, за указанный период в целом наблюдается тенденция к снижению выбросов по всей республике.

Подписанное в Париже 12 декабря 2015 года 195 странами-участницами Всемирной конференции ООН по климату COP 21 итоговое рамочное соглашение призвано остановить процесс перегрева планеты Земля на уровне не более 2 градусов Цельсия в год. Документ подписала и Республика Беларусь.

Страны также договорились, что к 2022 году каждое государство установит национальные цели по сокращению выбросов в атмосферу, технологическому перевооружению и утвердит список конкретных мер по адаптации к изменению климата. В 2023 году должна произойти первая всеобщая оценка результатов заявленных планов.

Участники COP 21 достигли соглашения по вопросу необходимости отказа от использования углеводородного топлива. Более того, некоторые страны назвали определенную дату, когда применение транспортных средств на сгораемом топливе станет вне закона. Так, альянс ZEV (Zero emission vehicle alliance), в состав которого в данный момент входят Германия, Великобритания, Нидерланды, Норвегия, а также американские штаты Калифорния, Коннектикут, Мэриленд, Массачусетс, Нью-Йорк, Орегон, Род-Айленд, Вермонт и канадский франкоязычный регион Квебек, приняли решение, что участники этого объединения готовы ввести полный запрет на бензиновые и дизельные машины в 2050 году.

В Великобритании уже сегодня имеется четвертый в мире и самый большой среди стран ЕС рынок транспортных средств с ультранизкими выбросами CO₂. Аналогичные сроки – 2050 год – поставил перед собой японский концерн Toyota, который тоже пообещал отказаться от двигателей внутреннего сгорания в пользу двигате-

лей, работающих на водороде, и электромобилей. Ford Motor в свою очередь намерен в ближайшие пять лет инвестировать 4,5 млрд долларов в расширение производства линейки гибридных моторов, чтобы доля электротранспорта достигла 40 %.

В свете этих решений роль электрического транспорта в уменьшении загрязнения атмосферы крупных городов резко возрастает. Производством троллейбусов занялись в основном автобусостроительные предприятия. В Республике Беларусь производством троллейбусов занят завод ОАО «Белкоммунмаш» (БКМ). Трамваи выпускает ОАО «StadlerMinsk». Так, в 2007 году на линии городского транспорта вышел троллейбус четвертого поколения модели 420, который способен без контактной сети проехать до 5 км (рис. 3).



Рис. 3. Белорусский троллейбус модели 420 с автономным ходом до 5 км

На базе троллейбуса модели 420 к 2012 году разработаны и изготовлены опытные образцы автобуса А420 с гибридной силовой установкой, которая позволяет существенно снизить вредные выбросы в городскую атмосферу (рис. 4).

Продолжая работу по повышению автономного хода троллейбусов, к 2015 году на базе серийного троллейбуса модели 321 разработана модификация с аккумуляторными батареями, позволившая увеличить автономный ход троллейбуса до 15 км (рис. 5).



Рис. 4. Белорусский автобус А420 с гибридной силовой установкой



Рис. 5. Троллейбус модели 321 с аккумуляторными батареями:
а – внешний вид; *б* – установка аккумуляторных батарей

С января 2017 года такие троллейбусы эксплуатируются на улицах Гродно (рис. 6).



Рис. 6. Первый белорусский электробус на улице в Гродно

На базе троллейбуса модели 420 разработан сочлененный низкопольный троллейбус (электробус) E43303 Vitovt Max Electro с тремя осями, из которых две ведущие, сочетающий в себе возможности троллейбуса и автобуса одновременно (рис. 7).



Рис. 7. Электробус E433 завода Белкоммунмаш

Белорусский Vitovt Max Electro, в отличие от других подобных машин, оснащен передовой системой накопителей электроэнергии на базе так называемых суперконденсаторов (ионисторов), позволяющей обеспечить движение по маршруту с быстрой подзарядкой на конечных остановочных пунктах специальными зарядными станциями (рис. 8).



Рис. 8. Подзарядка электробуса E433 на остановке

Подзарядка проходит в автоматическом режиме через полупантограф. Все происходит очень быстро – при разряде накопителей не более 30 % подзарядка длится примерно 5–7 минут. За это время электробус успевает накопить энергию, достаточную для прохождения с полной нагрузкой как минимум 12 км. При этом работать на маршруте, периодически подзаряжаясь на конечных (промежуточных) станциях, электробус может весь день.

Для пробега на одной подзарядке 20–30 км нужно добавить определенное количество суперконденсаторов. Но это приведет, во-первых, к удорожанию электробуса, а во-вторых, к увеличению снаряженной массы машины и, как следствие, уменьшению пассажироместности.

На основе 12-метрового электробуса E420 Vitovt Electro II УКХ «Белкоммунмаш» была разработана оригинальная модель электробуса E490, предназначенная для работы в горных местностях (рис. 9).

Из его назначения вытекает и малогабаритная конструкция – длина кузова составляет 9500 мм. Однако база электробуса даже больше, чем у городских автобусов и равна 7150 мм. При этом минимальный радиус поворота равен всего 8,5 м, что меньше радиуса поворота городских автобусов. Улучшение маневренности электробуса E490 достигается применением всех управляемых колес (передних и задних) с независимой их подвеской с двумя гидравлическими телескопическими амортизаторами. На передних колесах устанавливаются шины 275/70 R22,5 производства «Белшина», на задних – широкопрофильные шины 385/55 R22,5. На электробусе имеется электронная система управления уровнем пола ECAS. Электробус оборудован электродвигателем ТАД-120-4БУ1 мощностью 120 кВт ОАО «Могилевский завод "Электродвигатель"». Для автономного хода применяются суперконденсаторы, время зарядки которых составляет 6–7 минут, которые обеспечивают автономный пробег 25 км (максимальный автономный ход составляет 45 км). Масса суперконденсаторов – 1350 кг. Пассажироместность электробуса E490 – 66 человек, предусмотрено 21 место для сидения.

Такие машины работают в столице Республики Беларусь с мая 2017 года. По мере совершенствования накопителей электрической энергии будет увеличиваться автономный пробег электробуса, и он может быть не только городским пассажирским транспортом, но и использоваться для пригородного сообщения.



Рис. 9. Электробус Е490 для работы в горных условиях

Троллейбусы с увеличенным автономным ходом. Принципиальное отличие и основное преимущество всех новых троллейбусов заключается в том, что они оснащены аккумуляторными батареями и могут проезжать не менее 15 км без питания от контактной сети (с опущенными токоприемниками). Наличие значительного автономного хода придает новым троллейбусам мобильность, позволяет объезжать ремонтируемые участки проезжей части дорог, места, где произошли ДТП и повреждения контактной сети. Появляется также возможность при необходимости менять трассы маршрутов и продлевать их в новые районы без устройства дорогостоящей контактной сети.

В Республике Беларусь такие троллейбусы выпускают МАЗ (рис. 10) и УКХ «Белкоммунмаш» (ВКМ Holding), рис. 11 и рис. 12.



Рис. 10. Троллейбус МАЗ-203Т70 с увеличенным автономным ходом



Рис. 11. Троллейбус модели БКМ 32100D с увеличенным автономным ходом



Рис. 12. Троллейбус модели БКМ 43300D с увеличенным автономным ходом

Часть троллейбусов укомплектована электродвигателями ДТА-ЗУ1 с максимальной 30-минутной мощностью 200 кВт, которые выпускает АО «Псковский электромашиностроительный завод». Другая часть – электродвигателями ТАД-155-4-БУ1 с максимальной 30-минутной мощностью 185 кВт производства ОАО «Могилев-лифтмаш» (ОАО «Могилевский завод "Электродвигатель"»). Аккумуляторная батарея – Winston Battery емкостью 100 А·ч, масса 576 кг. Батареи размещаются в базе и заднем свесе. Пассажировместимость – 90 человек, 31 место для сидения.

УКХ «Белкоммунмаш» (БКМ Holding) начал выпускать троллейбусы большой и особо большой вместимости – модели БКМ 32100D и БКМ 43300D с увеличенным автономным ходом соответственно.

Модель БКМ 32100D – это рестайлинговый вариант троллейбуса третьего поколения. В белорусскую столицу такие машины попали в 2019 году, но их экстерьер минчанам хорошо знаком по электробусам Е321 «Сябр».

Аккумуляторные батареи (литий-железо-фосфатные) размещены в заднем свесе за глухой перегородкой. Электродвигатель – могилевский ТАД-155-4-БУ1 с максимальной 30-минутной мощностью 185 кВт. Пассажировместимость – 90 человек, 25 мест для сидения.

Сочлененный троллейбус БКМ-43300D также имеет электробусный аналог Е433 Vitovt Max Elelectro II, но существует и обычный троллейбус БКМ-43300, который поставлялся в Санкт-Петербург и Кишинеv.

Однако у троллейбуса БКМ-43300D есть существенные отличия. И это не только увеличенный автономный ход (15 км), но и отдельный вход в кабину водителя со своей дверью.

Двери в троллейбусе не выдвигаются наружу, а открываются внутрь салона, поэтому срабатывают быстрее. Благодаря тому, что аккумуляторные батареи размещены на крыше, сзади освободилось достаточно пространства, чтобы разместить дополнительно 5 мест для сидения. Всего их в троллейбусе 38, а общая пассажировместимость – 159 человек. Вместо глухой стенки сзади размещено окно, что увеличивает освещенность салона.

Что касается электрической части, то следует отметить, что применен батарейный блок собственного производства ОАО «УКХ «БКМ». Его емкость – 122,6 кВт·ч, и размещен он на крыше первой

секции. Используется электродвигатель АТЧД-250П-4У2 производства АО «Баранчинский электромеханический завод» с пиковой мощностью 225 кВт.

Все новые троллейбусы с увеличенным автономным ходом оснащены отдельными кондиционерами салона и кабины водителя (у БКМ-43300D по одному в салоне каждой секции). По требованию заказчика все двери оборудованы кнопками открытия по требованию пассажира (так называемые теплые кнопки), в салонах имеются USB-порты для подзарядки гаджетов, системы видеонаблюдения и видеорегистраторы. Чтобы опустить или поднять штанги, водителю не нужно выходить из кабины, достаточно нажать специальную кнопку на приборной панели.

Кроме того, все они получили более современное оснащение и кондиционеры, им не нужны зарядные станции – они заряжаются в процессе движения. Чтобы гарантировать запас автономного хода не менее 15 км и резервный остаток 30 % энергии, им достаточно проехать с поднятыми штангами под контактной сетью 30 минут.

В Республике Беларусь разработаны и современные сочлененные трамваи. Так, ОАО «StadlerMinsk» разработало 100%-низкопольные трамвайные вагоны моделей В853 с одной кабиной управления, В85300М и В85600М – с двумя кабинами управления, предназначенные для рынков Центральной и Восточной Европы (рис. 13 и 14).



Рис. 13. Сочлененный низкопольный трамвай В85300М.
Длина – 26,715 м, пассажироместность – 254 чел. (58+196)



Рис. 14. Сочлененный низкопольный трамвай «Метелица» В85600М.
Длина – 33,450 м, пассажироместимость – 370 чел. (66+304)

Новейший трамвайный вагон «Метелица» модели В85600М спроектирован и изготовлен на заводе «StadlerMinsk» для частной транспортной концессионной компании (ТКК) и трамвайной сети «Чижик» из Санкт-Петербурга. По длине, вместительности и мощности он является лучшим на территории СНГ. Эти трамваи в настоящее время эксплуатируются в Санкт-Петербурге.

Сочлененные низкопольные вагоны с повышенной пассажироместимостью состоят из трех секций. Концепция трамвайных вагонов моделей В85300М и В85600М предназначена для скоростных городских линий с большим пассажиропотоком.

В Республике Беларусь разработана и принята Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 гг. [10]. Она нацелена на создание производств средств электротранспорта различного функционального назначения и их компонентной базы для поэтапного наращивания использования электрической энергии в пассажирских и грузовых перевозках.

В области разработок и применения пассажирского электротранспорта выделяются два основных направления:

– электробусы с быстрой зарядкой (3–8 минут) для городских и иных перевозок по коротким маршрутам;

– электробусы с батареями повышенной емкости (8–10 часов работы), заряжаемые, как правило, в ночное время суток.

На настоящий момент электробусы, как правило, снабжаются электричеством с помощью зарядных устройств, расположенных в депо или конце автобусных маршрутов. В европейских городах подавляющее большинство электробусов (~ 90 %) используют ночную зарядку в депо при параллельной быстрой зарядке в рабочее время.

В эксплуатируемом в РБ парке городского пассажирского электротранспорта наибольший удельный вес занимают троллейбусы и электробусы. В республике эксплуатируется порядка 1500 троллейбусов и электробусов, осуществляющих перевозки пассажиров. В целях перевода коммунального транспорта на электротягу ОАО «МАЗ» в рамках действующего производства с 2023 года приступит к выпуску мусоровозов с тяговым электроприводом с использованием кабины, применяемой на серийных моделях автомобилей (рис. 15).



Рис. 15. Эскизный проект мусоровоза с электроприводом новой концепции

Показ электрического грузовика новой модели МАЗ-4381ЕЕ состоялся 4 февраля 2022 г. в Минске в рамках выставки, приуроченной к 100-летию белорусской академической науки и Дню белорусской науки (рис. 16).



Рис. 16. Новая модель электрического грузовика MAZ-4381EE

В основе новинки – шасси хорошо известного среднетоннажного грузовика MAZ-4381. На такой же базе был создан и первый электрогрузовик MAZ-4381E0 (рис. 17), представленный еще летом 2020 года. MAZ-4381EE отличается от предшественника не только дизайном кабины, но и конструктивно. В новом электрогрузовике силовой агрегат (электродвигатель с коробкой передач) размещен внутри рамы и смещен к задней ведущей оси. Сам двигатель более мощный (170 кВт против 140 кВт на «пике»).

Средний расход электроэнергии у нового электрогрузовика составляет 0,98 кВт·ч/км. При использовании медленного типа зарядки (ночью в парке) батареи заряжаются за 12 часов. Время быстрой зарядки составляет 3 часа (при токе заряда 300 А).

Намечена разработка электробуса для перевозки пассажиров в аэропортах общей пассажировместимостью 104 человека и запасом хода не менее 60 км; мощность электродвигателя – 160 кВт. Предполагается, что ОАО «МАЗ» выполнит разработку грузового электромобиля грузоподъемностью до 4 тонн для осуществления перевозок грузов во внутригородском и межрайонном сообщениях. ОАО «Управляющая компания холдинга «Белкоммунмаш» – грузового электромобиля грузоподъемностью до 10 тонн с подготовкой

под установку системы беспилотного управления для перевозки грузов в городских и заводских условиях.



Рис. 17. Первый электрический грузовик MAZ-4381E0

Суммарная прогнозируемая потребность пассажирского электротранспорта новых видов (электробусы и троллейбусы с автономным ходом) для коммунальных нужд составит 2453 единицы в пятилетнем периоде, в том числе по регионам:

- Брестская область – 61 электробус;
- Витебская область – 140 электробусов, 45 троллейбусов с автономным ходом;
- Гомельская область – 196 электробусов, 83 троллейбуса с автономным ходом;
- Гродненская область – 168 электробусов, 85 троллейбусов с автономным ходом;
- Минская область – 125 электробусов;
- Могилевская область – 150 электробусов, 50 троллейбусов с автономным ходом;
- г. Минск – 350 электробусов, 1000 троллейбусов с автономным ходом.

Удовлетворение потребности в новых видах пассажирского электротранспорта предполагается за счет использования мощностей, которыми в настоящее время располагают организации-производители: потенциал для ОАО «Управляющая компания холдинга «Белкоммунмаш» – 600 единиц, для ОАО «МАЗ» – 200 единиц электротранспорта в год.

Стало известно о возможном приходе на отечественный рынок абсолютно нового полностью электрического сити-кара.

Модель А01 гродненского стартапа Sidus (рис. 18) уже получила сертификат, позволяющий продавать электрокар на территории Таможенного союза. Длина электромобиля – 2,25 м, масса – 620 кг. Движение обеспечивается электромотором мощностью 9,2 кВт. Максимальная скорость достигает 80 км/ч. На полностью заряженной батарее он может проехать до 120 км. Зарядить аккумулятор можно за 5 ч, а управлять электроавтомобилем можно с обычными правами категории «В».



Рис. 18. Возможный вариант электрического сити-кара А01 для Беларуси

В СЗАО «БЕЛДЖИ» планируется освоить серийный выпуск электромобилей на основе модели «Geometry С» (рис. 19). Там же будет осуществлена доработка системы мультимедиа (русифика-

ция) и зарядного устройства (адаптация под международный стандарт IEC 62196-2:2016).



Рис. 19. Электромобиль «Geometry C»

Электромобиль «Geometry C» на одной зарядке аккумуляторной батареи сможет проехать до 550 км. Модель будет снабжена функцией распознавания знаков и адаптированным круиз-контролем. Сообщается, что отдельные детали будут выпускаться на заводе под Борисовом.

На ОАО «МТЗ» планируется разработать и организовать выпуск льдозаливочной машины «БЕЛАРУС КЛ-418», на ОАО «БЕЛАЗ» – карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн в дизельтроллейбусном исполнении и карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн, на ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» – средств индивидуального электротранспорта и его компонентов, на ОАО «Могилевлифтмаш» – электродвигателя для коммерческого транспорта.

Приоритетом при проведении работы по обновлению парка подвижного состава будет являться расширение применения электробусов и троллейбусов с увеличенным автономным ходом. В г. Минске будет решаться задача полного обновления до 2025 года троллейбусов и 1000 автобусов с их частичной заменой на троллейбусы с увеличенным автономным ходом. В 2021–2025 годах государ-

ственным предприятием «Минсктранс» предусмотрено приобретение 1000 троллейбусов с увеличенным автономным ходом. Это позволит расширить производственную базу троллейбусов с 753 до 1220 единиц и довести долю электрифицированного транспорта в общем парке транспортных средств до 55 %. Существующая инфраструктура позволяет увеличить парк троллейбусов г. Минска суммарно до 1400 единиц.

В настоящее время развивается новое направление в автономном и электрическом транспорте – переход на работу подвижного состава без водителя, так называемый беспилотный подвижной состав.

Как заявляют представители компании TuSimple, в автомобильных грузоперевозках в среднем около 40 % всех эксплуатационных расходов приходится на водителя, а беспилотная техника обойдется значительно дешевле. Кроме того, по данным этой же компании, ее автономные грузовики экономят до 10 % топлива по сравнению с автопоездами, управляемыми обычными водителями.

Заметим, что и белорусские автопроизводители занимаются разработкой автономной техники. Лидером на этом направлении является Белорусский автомобильный завод, беспилотные самосвалы которого уже работают в карьерах. В настоящее время доступны к заказу две роботизированные модели – 90-тонный БЕЛАЗ-7558R и 130-тонный БЕЛАЗ-7513R (рис. 20).



Рис. 20. Беспилотный карьерный самосвал ОАО «БЕЛАЗ»

ВКМ Holding предусматривает возможность установки системы беспилотного управления на свой электрический городской грузовик (рис. 21).



Рис. 21. Беспилотный городской грузовик фирмы ВКМ Holding

Минский автозавод пообещал выпустить на испытания в 2022 году беспилотный электробус (рис. 22).



Рис. 22. Беспилотный электробус минского автозавода

Таким образом, к преимуществам электротранспорта относятся: энергоэффективность, более высокая производительность по перевозке пассажиров и грузов по сравнению с транспортом, использующим двигатели внутреннего сгорания, сокращение выбросов парниковых газов и вредных веществ, снижение уровня загрязнения воздуха, оздоровление городской среды и повышение безопасности на дорогах. Электротранспорт все активнее используется в народном хозяйстве для перевозок пассажиров и грузов. Так, в настоящее время в развитых странах на долю электротранспорта (электромобили, трамваи, троллейбусы, метрополитен, электропоезда) приходится половина перевозок пассажиров. В конце 2018 года в эксплуатации, по разным оценкам, находилось от 385 до 460 тыс. городских электробусов, что составляет примерно 13 % от мирового парка городских автобусов.

Эффективность функционирования подвижного состава определяется его *потенциальными свойствами* и *степенью их использования* в реальных условиях эксплуатации. Различают две группы потенциальных свойств: функциональные свойства и свойства надежности.

Функциональные свойства определяются пассажировместимостью подвижного состава и характеризуют его возможность выполнять предписанные свойства. Эти свойства проявляются при движении подвижного состава и характеризуют его предельные эксплуатационные возможности.

Свойства надежности характеризуют способность подвижного состава сохранять работоспособное состояние в установленном интервале времени или километрах пробега.

Функциональные свойства и свойства надежности определяют степень приспособленности подвижного состава к перевозкам пассажиров в городских условиях.

В теории электрического транспорта изучаются только функциональные свойства. К ним относятся: тягово-скоростные и тормозные свойства, криволинейное движение подвижного состава, управляемость, маневренность, устойчивость, колебания и плавность хода, проходимость.

Тягово-скоростные свойства подвижного состава характеризуют его способность перевозить пассажиров или грузы с высокой средней скоростью и преодолевать подъемы.

Тормозные свойства подвижного состава характеризуют его способность к снижению скорости движения при одновременном исключении заносов или схода с рельс с целью предотвращения дорожно-транспортных происшествий и повышения безопасной скорости движения.

Управляемость – свойство электробуса (троллейбуса) и электромобиля, определяющее его способность изменять направление движения в соответствии с воздействием водителя на рулевое управление.

Маневренность – свойство подвижного состава двигаться по траектории минимального радиуса в проездах заданной формы и на ограниченных площадках.

Устойчивость – свойство подвижного состава, определяющее его способность сохранять движение по заданной траектории, противодействуя силам, стремящимся вызвать боковое смещение или опрокидывание.

Плавность хода – свойство подвижного состава, характеризующее его способность уменьшать амплитуды колебаний кузова при движении по неровностям дороги или рельсового пути и снижать вибронагруженность водителя, пассажиров или груза и механизмов подвижного состава.

Проходимость – свойство электробуса (троллейбуса), характеризующее его способность преодолевать искусственные препятствия (ямочный ремонт дороги, бордюрные камни и другие препятствия).

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

1.1. Общественный транспорт в современном городе

Общественный пассажирский транспорт является неотъемлемой частью единой структуры всего городского хозяйства, непосредственно влияющей на условия работы и жизнь городского населения. Наличие и степень развития общественного транспорта определяют возможность нормальной жизнедеятельности города. В настоящее время общественный пассажирский транспорт осуществляет перевозки пассажиров во многих населенных пунктах республики.

Транспортная подвижность населения и средняя дальность поездки пассажира зависит в основном от количества жителей города и размеров его территории. В табл. 1.1 приведена транспортная классификация, согласно которой все города в зависимости от количества населения делятся на 6 групп, каждой из которых соответствует определенная подвижность населения, т. е. среднее количество поездок, приходящееся в год на одного жителя.

Таблица 1.1

Транспортная классификация

Группа городов	Население, тыс. чел.	Транспортная подвижность населения		Виды транспорта (ориентировочно)
		современная	перспективная	
I – крупнейшие	1000–2000	300–400	580–800	Обязателен внеуличный скоростной транспорт
II – крупные	500–1000	330–360	515–700	Автобус, электробус (троллейбус), основной вид транспорта – трамвай, в частности скоростной
III – крупные	250–500	300–330	450–650	Автобус, электробус (троллейбус), трамвай
IV – большие	100–250	200–300	385–550	Автобус, электробус (троллейбус)
V – средние	50–100	100–250	300–450	Автобус
VI – малые	Менее 50	70–150	200–350	Автобус

Нормальная жизнь современного города невозможна без удобных и надежных транспортных связей. Уровень развития, разветвленность, плотность маршрутной сети городского пассажирского транспорта определяют время, которое городской житель затрачивает на необходимые поездки. Важным показателем, характеризующим качественный уровень транспортного обслуживания, является скорость $v_{\text{нас}}$ передвижения населения, которая учитывает суммарную затрату времени на передвижение между пунктами отправления и прибытия:

$$v_{\text{нас}} = \frac{60L_{(m-n)}}{t'_{\text{пеш}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{пер}} + t''_{\text{пеш}} + t_{\text{тр}}},$$

где $L_{(m-n)}$ – расстояние между пунктами m и n , км;

$t'_{\text{пеш}}$ – усредненная затрата времени на первый пешеходный переход, мин;

$t_{\text{ож}}$ – усредненная затрата времени на ожидание транспорта, мин;

$t''_{\text{пеш}}$ – усредненная затрата времени на второй пешеходный переход, мин;

$t_{\text{тр}}$ – усредненная затрата времени на поездку в транспорте, мин.

Если скорость передвижения населения в сообщении с центром города менее 9,6 км/ч, то это указывает на неудовлетворительный уровень транспортного обслуживания.

Действующие в настоящее время Строительные нормы и правила (СНиП 2.07.01-89) устанавливают жесткие требования к затратам времени на передвижения горожан. Так, даже в городах-миллионерах трудящиеся не должны расходовать на дорогу от места проживания до места приложения труда более 45 мин в один конец.

Продолжительность поездки, ее комфортность определяется так называемой транспортной усталостью пассажира, которая влияет на производительность и качество его труда. Специалисты подсчитали, что каждые 10 минут дополнительного времени, затраченные на передвижение к месту работы снижают производительность труда на 3–4 %.

Городской электрический транспорт – общественный пассажирский транспорт, который предназначен для перевозки пассажиров в городах на относительно небольшие расстояния. Наиболее распространенными видами городского электротранспорта являются элект-

робус, троллейбус и трамвай. В крупных городах, где необходима перевозка большого числа пассажиров, предусматривается метрополитен, т. е. подземные электрифицированные железные дороги.

Известно, что каждый вид городского пассажирского транспорта обладает ограниченной провозной способностью. В табл. 1.2 приведены ориентировочные значения пассажиропотоков, которые способны удовлетворить различные виды городского транспорта.

Таблица 1.2

Ориентировочные значения пассажиропотоков

Вид транспорта	Характеристика производительности транспорта	Провозная способность, тыс. пасс./ч	Примечание
Метрополитен	Очень высокая	25–30; 45–55	При 6–8-вагонном составе
Трамвай	Высокая	3,5–4,5; 12–23	Максимум для 8-осных вагонов
Троллейбус, электробус, автобус	Средняя	2–2,5; 6–12 0,6–0,7; 5–8	Максимум для сочлененных машин
Легковой автомобиль	Низкая	1–1,5	Максимальная

Старейшим видом городского электрического пассажирского транспорта является трамвай. На территории Беларуси использование электрического городского транспорта началось в 1898 г. открытием трамвайного движения в г. Витебске. Обычный трамвай рационально используется на маршрутах с пассажиропотоками от 4 до 12 тыс. пассажиров. Скоростной трамвай, отличительными особенностями которого являются пересечение линий в разных уровнях с пешеходами и транспортным движением, проектируется в городах с населением более 500 тыс. чел. на направлениях с пассажиропотоками от 10 до 25 тыс. пассажиров в час. В настоящее время трамваи используются в Минске, Витебске, Мозыре и Новополоцке.

С открытием первой очереди троллейбусной линии в г. Минске 19 сентября 1952 г. в Беларуси начало развиваться троллейбусное движение. В дальнейшем троллейбусное движение было открыто во

всех областных городах республики и г. Бобруйск. Троллейбусный транспорт пользуется большой популярностью в городах, выполняет значительный объем пассажирских перевозок и используется на направлениях с пассажиропотоками от 3 до 8 тыс. пассажиров в час в качестве основного вида транспорта или как подвозящего к линиям скоростного рельсового транспорта.

Метрополитен является внеуличным видом городского транспорта. Он обладает наибольшей провозной способностью из всех существующих видов городского транспорта и используется в городах с населением свыше 1,5 млн чел. на направлениях с устойчивыми пассажиропотоками, превышающими 25 тыс. пассажиров в час. В Беларуси метрополитен функционирует с 1984 г. в г. Минск.

Во многих городах функционируют автобусы. Растет число такси, служебных и личных легковых автомобилей. Максимальные удобства передвижения, полная автономность сделали легковой автомобиль одним из наиболее популярных средств передвижения населения. Однако легковым автомобилям требуются значительно большие площади дорог по сравнению с общественными видами транспорта (табл. 1.3), что объясняет необходимость соблюдать интервал между движущимися транспортными средствами, достаточный для экстренной остановки при возникновении опасности для движения.

Таблица 1.3

Характеристики вместимости и потребной площади улицы
для городского транспорта

Вид транспорта	Вместимость транспортной единицы, пасс.	Потребная площадь улицы на одного пассажира, м ²	
		в состоянии покоя	при движении (v = 50 км/ч)
Скоростной трамвай	270 (100 % наполнения)	0,34	1,56
	108 (40 % наполнения)	0,84	3,90
Автобус	86 (100 % наполнения)	0,41	3,47
	34 (40 % наполнения)	1,03	8,77
Легковой автомобиль	4 (100 % наполнения)	3,75	59,30
	1,4 (40 % наполнения)	10,70	169,00

Поэтому возрастающее насыщение городов легковыми автомобилями требует решения ряда градостроительных вопросов, связанных

с проведением дорогостоящих работ по расширению существующих магистральных улиц, реконструкции площадей и центральных районов городов. Стоит отметить, что при выполнении одинакового объема перевозок легковые автомобили в 12–15 раз интенсивнее загрязняют воздушный бассейн города по сравнению с автобусами.

Исходя из сказанного, при разработке основных направлений развития городского пассажирского транспорта считают, что наличие автомобилей личного пользования и ожидаемый дальнейший рост насыщения ими городов не окажет заметного влияния на потребность в транспортных средствах общего пользования. Преобладающая роль общественного пассажирского транспорта во внутригородских перевозках сохранится и в будущем.

Научные и конструкторские коллективы работают над дальнейшим совершенствованием электробусов, троллейбусов и трамваев, созданием подвижного состава бóльшей вместимости: сочлененных электробусов, троллейбусов и трамвайных вагонов, а также над повышением автономного хода троллейбусов. Внедрение нового подвижного состава значительно сократит расход электроэнергии, повысит провозную способность маршрутов, поможет решить задачу полного обеспечения потребностей населения в перевозках, повышения их качества и комфортабельности.

1.2. Требования к городскому транспорту. Классификация

К конструкции подвижного состава городского транспорта предъявляют производственные, эксплуатационные, потребительские, экологические требования, требования безопасности (активной, пассивной).

Производственные требования – это соответствие конструкции подвижного состава технологическим возможностям изготовителя, а также передовым тенденциям новейшей технологии, минимальный расход материалов и энергии, необходимых для изготовления, наименьшая трудоемкость и себестоимость продукции.

Эксплуатационные требования – соответствие конструкции дорожным и климатическим условиям региона его эксплуатации. Этим объясняется выпуск подвижного состава в «северном», «тропическом» и других вариантах. Сюда же относят и требования по энерге-

тической экономичности, устойчивости движения, управляемости, маневренности и проходимости, плавности хода, надежности, технологичности обслуживания и ремонта, минимальной себестоимости транспортных перевозок пассажиров.

Потребительские требования – низкая стоимость подвижного состава и его эксплуатации, возможность использования для различных технических и потребительских нужд, безотказность, ремонтпригодность, безопасность, комфортабельность, легкость управления.

Экологические требования сводятся к уменьшению вредного воздействия на окружающую среду, снижению шума, радиопомех и вибрации.

При проектировании электрического транспорта необходимо ориентироваться на мировой опыт максимальной унификации с автобусом.

К подвижному составу городского электрического транспорта предъявляются следующие требования:

- оптимальное сочетание скоростных и тяговых характеристик;
- простота и надежность конструкции;
- минимальная конструктивная масса, оптимальные габаритные размеры (выступающие детали должны легко сниматься);
- низкий уровень звукового давления и вибрации в кабине водителя и в салоне;
- простота технического обслуживания и ремонта;
- максимальная скорость движения до 80 км/ч, минимальная скорость – 4 км/ч; тяговый электродвигатель должен обеспечить требуемую приемистость;
- наличие рабочей, стояночной и запасной тормозных систем (стояночная система должна надежно удерживать подвижной состав на опорной поверхности с уклоном не менее 25 %);
- возможность перевозки подвижного состава различными видами наземного и железнодорожного транспорта.

Наиболее общими признаками классификации подвижного состава городского транспорта являются: функциональное назначение, тип базовой конструкции, тип движителей, компоновка оборудования, агрегируемого с базовой конструкцией, способ подвода энергии к ходовой системе, грузоподъемность (пассажировместимость).

Современный городской транспорт по своему назначению подразделяется на следующие категории:

– пассажирский: электрифицированные железные дороги (городские линии), метрополитен, трамвай, троллейбус, электробус, автобус, легковые автомобили;

– грузовой: грузовые трамваи, троллейбусы, автомобили;

– специальный: санитарные и пожарные автомобили, автомобили для уборки улиц и т. п.

В свою очередь, пассажирский транспорт в зависимости от вида пользования транспортными средствами и их принадлежности подразделяется на три группы:

– общественный массового пользования: электрифицированные железные дороги (городские линии), метрополитен, трамвай, троллейбус, электробус, автобус;

– общественный индивидуального пользования: такси, ведомственные легковые автомобили и автомобили проката;

– личный индивидуального пользования: легковые автомобили, мотоциклы.

Общественный и личный транспорт индивидуального пользования по условиям организации движения объединяют под общим названием «легковой автомобильный транспорт».

Массовый транспорт общего пользования отличается значительной по сравнению с индивидуальным транспортом вместимостью и большой провозной способностью. Характерной особенностью массового транспорта является его работа на установленных маршрутах. Классификация массового пассажирского транспорта проводится по различным признакам.

В зависимости от расположения транспортных линий относительно улиц массовый транспорт подразделяется на:

– уличный: трамвай, троллейбус, электробус, автобус;

– внеуличный: метрополитен, глубокие вводы электрифицированных железных дорог.

По характеру путевых устройств различают два вида городского транспорта:

– рельсовый: метрополитен, трамвай, глубокие вводы электрифицированных железных дорог;

– безрельсовый: троллейбус, электробус, автобус.

По роду используемой двигательной силы весь городской общественный транспорт объединяют в две большие группы:

– с электрическим двигателем: метрополитен, трамвай, троллейбус, электробус, глубокие вводы электрифицированных железных дорог;

– с двигателем внутреннего сгорания: автобус с дизельным или бензиновым двигателем.

Подвижной состав подразделяется по общему числу осей (колесных пар) и числу ведущих осей или колесной формуле. Для троллейбусов первая цифра обозначает общее число колес, вторая – число ведущих колес (4×2, 6×2, 6×4 и т. д.). Наибольшее распространение получили двух- и трехосные троллейбусы. По колесной формуле трамваи бывают четырехосные (4×4), десятиосные (10×8) и др.

Компоновка подвижного состава – взаимное расположение основного оборудования (кабины с управлением, салона для пассажиров, одного или нескольких тяговых электродвигателей, ведущих и управляемых колес, трансмиссии и т. д.). На компоновку влияют тип двигателя и трансмиссии, число осей и размещение их по базе, тип несущей системы, подвеска и другие факторы. Она должна обеспечить рациональное размещение пассажиров в салоне, удобство входа и выхода, хорошую обзорность, безопасность, удобства обслуживания, высокие эксплуатационные свойства, а также удовлетворять различным ограничениям (железнодорожным габаритам, правилам дорожного движения и т. п.).

В свою очередь, компоновка оказывает влияние на массу подвижного состава, его вместимость, степень воздействия на опорную поверхность (дорогу, рельсовый путь), технологию сборки, способность преодолевать уклоны, препятствия и т. д. Она в значительной степени определяет внешний вид и является основой для дизайнерской разработки ПС.

1.3. Оценочные показатели городского электрического транспорта

Оценка качества городского электрического транспорта производится по определенным показателям, зависящим от условий эксплуатации. К основным показателям относятся массовая характеристика, габариты, полезная площадь салона, число перевозимых пассажиров (пассажировместимость), динамические показатели, плавность хода и удельный расход электроэнергии.

1.3.1. Массовые характеристики подвижного состава

К показателям массовой характеристики подвижного состава (ГЭТ) относятся:

– масса подвижного состава в ненагруженном состоянии (снаряженная масса) $m_{сн}$;

– полная масса ПС m и номинальная масса $m_{ном}$ при номинальной загрузке салона 5 чел./м²;

– распределение веса подвижного состава по мостам (тележкам) G_i , где i – порядковый номер моста или тележки, и колесам (колесным парам) G_{ki} в снаряженном состоянии и при номинальной загрузке салона;

– собственная масса подвижного состава, приходящаяся на 1 м² площади пола салона;

– коэффициент использования массы подвижного состава.

Полная масса подвижного состава – масса снаряженного подвижного состава с водителем, кондуктором и пассажирами, которая определяется по формуле

$$m = m_{сн} + m_{пас} (n + k) + m_{обсл} \cdot n_{обсл} + m_{баг} (n + k),$$

где $m_{пас}$, $m_{обсл}$, $m_{баг}$ – массы соответственно одного пассажира (при расчетах принимают $m_{пас} = 68$ кг), обслуживающего персонала (водитель, кондуктор; при расчетах принимают $m_{обсл} = 75$ кг) и багажа пассажиров (при расчетах принимают $m_{баг} = 3$ кг);

n , k – число мест для проезда пассажиров соответственно сидя и стоя;

$n_{обсл}$ – число обслуживающего персонала.

Снаряженная масса подвижного состава – масса ПС в снаряженном состоянии, но без водителя, кондуктора и пассажиров. Она зависит от его размеров, типа, вместимости пассажиров, конструкции и материалов, применяемых при изготовлении, и колеблется у одиночных троллейбусов от 10 т до 11,5 т (сочлененных троллейбусов – от 15,3 т до 17 т), одиночных четырехосных трамваев – от 18 т до 22 т (сочлененных трамваев – от 30 т до 40 т).

Распределение нагрузки (вес троллейбуса $G = mg$) по мостам троллейбуса зависит от расположения его центра масс и составляет:

– на передний мост приходится примерно 1/3 веса троллейбуса ($G_1 \approx G / 3$);

– на задний мост – 2/3 веса троллейбуса ($G_2 \approx 2G / 3$).

Отклонение от заданного распределения нагрузок связано с недоиспользованием сцепного веса (вес, приходящийся на ведущие колеса) троллейбуса и может привести к перегрузке отдельных колес, неравномерному износу шин. Допустимая величина нагрузки на мост и количество мостов определяются грузоподъемностью шин и являются одними из важнейших факторов при определении длины троллейбуса, конструкции его ходовой системы, удельной массовой характеристики.

Вес трамвая G распределяется по тележкам практически одинаково $G_1 \approx G_2 \approx G / 2$. Допустимая нагрузка колесной пары на рельс определяется прочностью верхнего строения (типом рельсов, основанием пути) рельсового пути. Для трамвая величина статической нагрузки обычно не превышает 120 кН в зависимости от конструкции вагона и применяемых материалов.

Допустимая нагрузка на колесо $[G_k]$ ограничивается смятием поверхности контакта колеса с рельсом и определяется по формуле

$$[G_k] = \frac{G_{k,\max}}{D_k},$$

где $G_{k,\max}$ – наибольшая нагрузка на колесо;

D_k – диаметр колеса.

При расчетах трамвайных колес принимают $G_k = 75$ Н/мм.

Нагрузку на один погонный метр длины рельсового пути ΔG_{rp} находят по выражению

$$\Delta G_{rp} = \frac{G_{\max}}{l_{сц}},$$

где G_{\max} – вес вагона при максимальной нагрузке;

$l_{сц}$ – длина вагона по осям сцепок.

Для трамвайных рельсовых путей величина ΔG_{rp} не должна превышать 20 кН/м.

Перечисленные ограничения являются основными при определении числа колесных пар трамвая, расстояний между их осями и диаметра колес. Нагрузка на колесную пару четырехосного трамвая принимается равной 7,5–9 т.

Собственная масса ПС, приходящаяся на 1 м² площади пола, характеризует уровень развития подвижного состава. Чем ниже этот показатель, тем совершенней конструкция кузова и оборудования. Удельная масса современных троллейбусов составляет 330–390 кг/м², трамваев – 570–650 кг/м².

Коэффициентом использования массы подвижного состава η_m называется отношение массы пассажиров при номинальной загрузке салона к массе подвижного состава в снаряженном состоянии:

$$\eta_m = \frac{m_{\text{НОМ}} - m_{\text{СН}}}{m_{\text{СН}}}.$$

Чем выше значение коэффициента η_m при прочих равных условиях, тем совершеннее конструкция подвижного состава и тем рациональнее используются материалы. Повышение коэффициента η_m достигается, с одной стороны, увеличением вместимости подвижного состава, а с другой стороны, снижением его конструктивной массы. Величина коэффициента использования массы современных троллейбусов находится в следующих пределах: для двухосных троллейбусов – 0,35–0,45, для сочлененных троллейбусов – 0,36–0,52. Величина коэффициента η_m современных трамваев достигает следующих значений: для четырехосных – 0,38–0,55, для шестиосных и восьмиосных – до 0,8.

Однако необходимо учитывать, что увеличение коэффициента использования массы за счет более плотного размещения сидений, уменьшения их размеров или увеличения количества мест для сидения пассажиров путем введения, например, продольных сидений снижает комфортабельность подвижного состава. Снижение массы подвижного состава при обеспечении заданных параметров – одна из важнейших задач проектирования. Она обуславливает не только снижение расхода материалов на изготовление, но также уменьшает расход электроэнергии на движение подвижного состава.

1.3.2. Габариты и полезная площадь салона

К габаритным показателям подвижного состава относятся наибольшая внешняя длина, ширина и высота, база, колея, передний и задний свесы.

Наибольшая длина подвижного состава обычно указывается с учетом буферов кузова (троллейбус) или с учетом сцепных устройств (трамвай) (рис. 1.1). Она обуславливается типом, вместимостью и количеством осей подвижного состава. Длина двухосных троллейбусов составляет 11–12 м, сочлененных – 16–18 м; длина четырехосных трамваев – 15–16 м, шестиосных – 25–33 м.

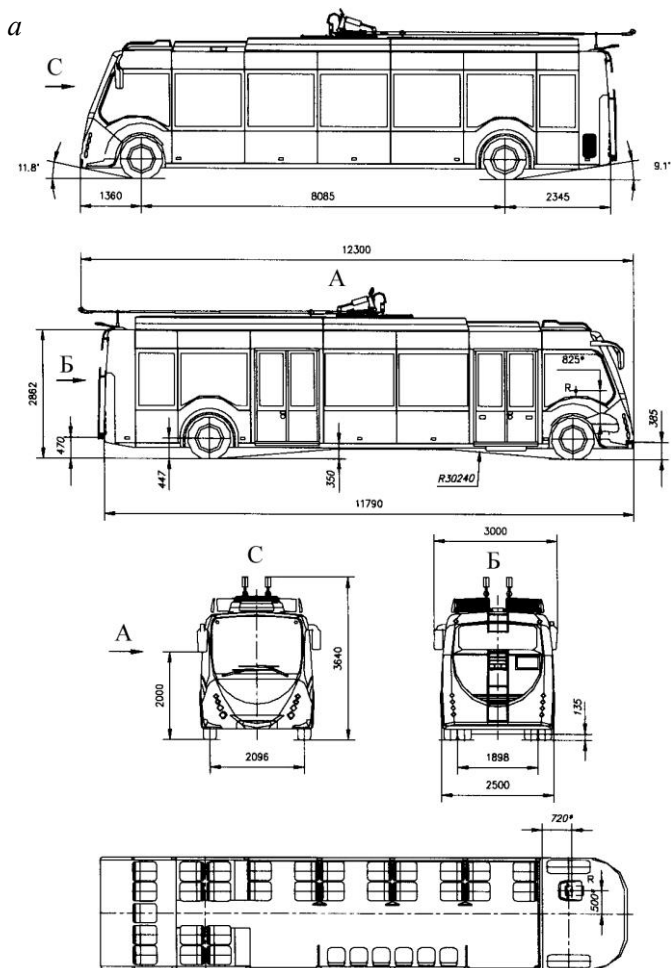
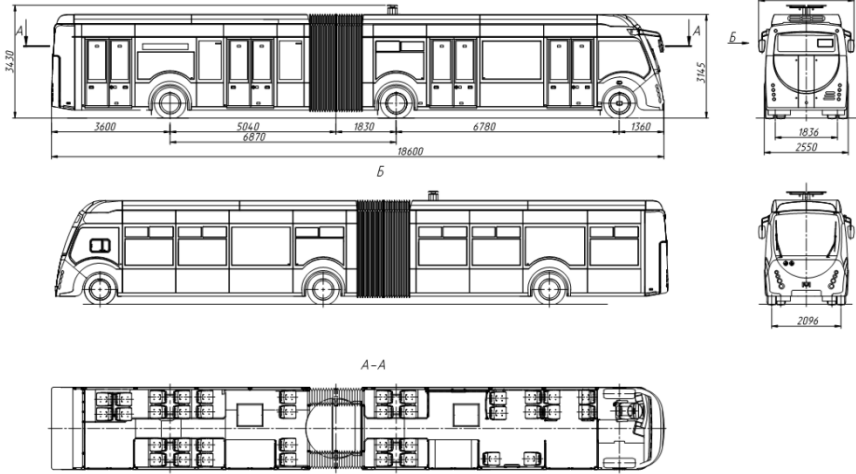
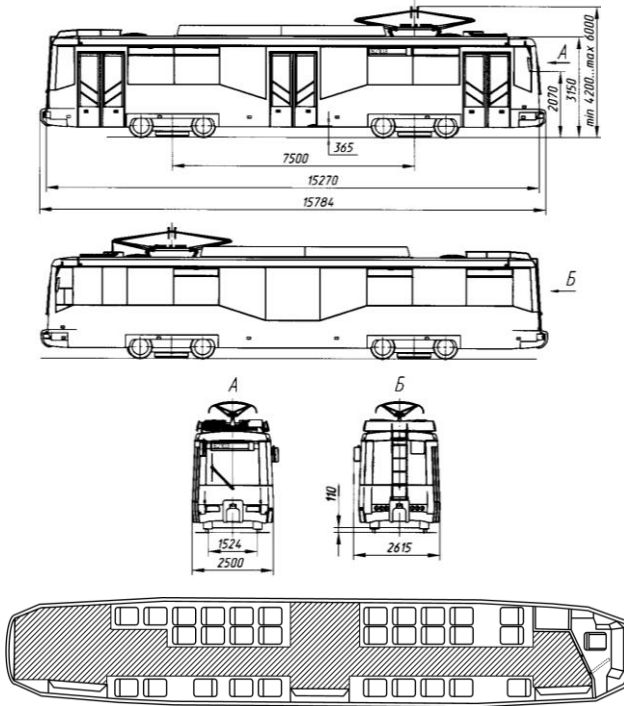


Рис. 1.1. Основные габаритные размеры и планировка салона подвижного состава:
a – троллейбус двухосный; *б* – троллейбус трехосный, сочлененный;
в – трамвай четырехосный; *г* – трамвай шестиосный, сочлененный

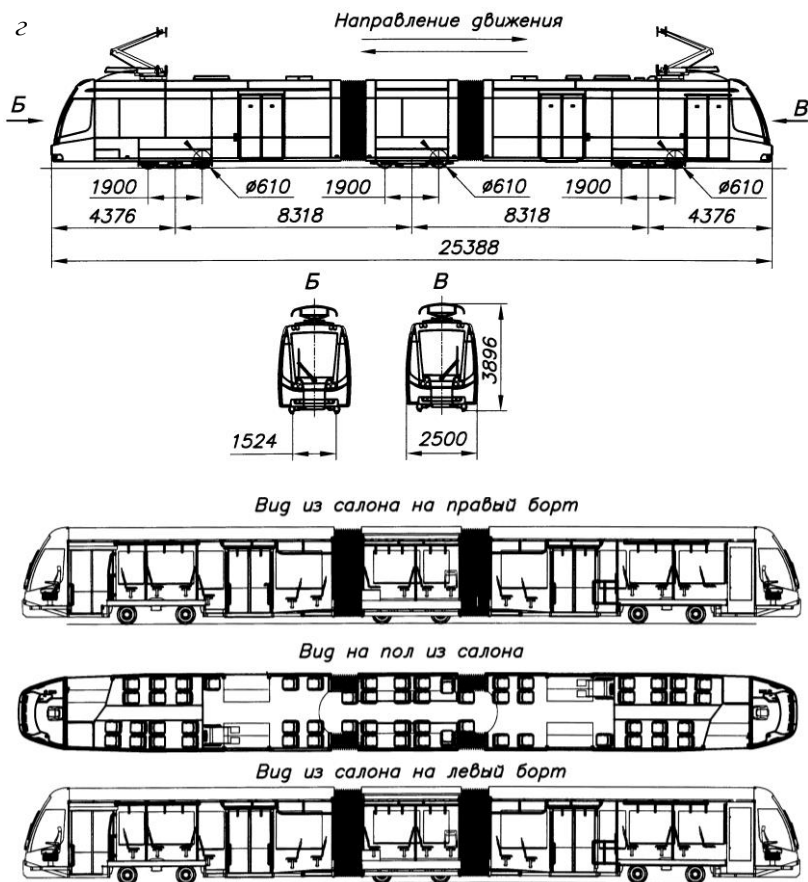
б



б



Продолжение рис. 1.1



Окончание рис. 1.1

Полная ширина подвижного состава (рис. 1.1) указывается с учетом обтекателей колес по наружной обшивке и находится в пределах 2,5 м для троллейбусов и 2,5–2,6 м для трамваев.

Высота троллейбусов приводится с учетом электрического оборудования, расположенного на крыше (рис. 1.1), и составляет 3–4,5 м, со штангами в рабочем положении – до 6 м. *Высота трамваев* определяется от головки рельсов до крыши с учетом электрического оборудования, расположенного на ней, и составляет 3,15–3,5 м. В некоторых случаях указывают высоту трамвая с учетом токоприемников

в опущенном и рабочем состояниях. В первом случае высота трамвая увеличивается на 0,5–0,6 м, а во втором – приблизительно на 3 м.

Габариты трамвайных вагонов показаны на рис. 1.2.

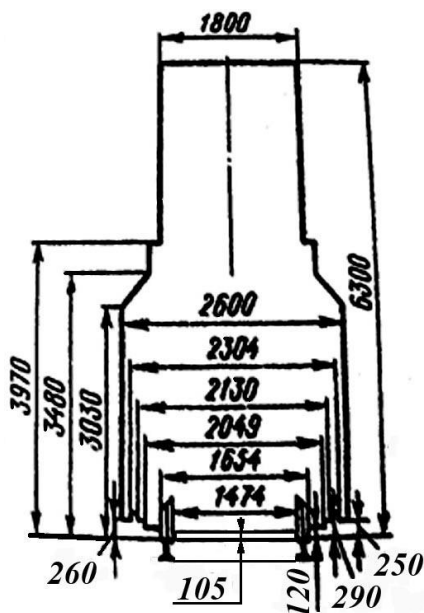


Рис. 1.2. Габариты трамвайных вагонов

Базой двухосного одиночного троллейбуса (рис. 1.1, а, б) является расстояние между центрами передней и задней осей, находится в пределах 5,6–8,0 м. Для трехосного одиночного троллейбуса с двумя задними ведущими осями базой является расстояние от центра передней оси до середины расстояния между средней и задней осями. В сочлененных троллейбусах различают базу основного троллейбуса и базу полуприцепа. Базой полуприцепа является расстояние между серединой сочленения и осью полуприцепа, находится в пределах 4–5 м.

Под колесей передних и задних колес троллейбуса понимается расстояние между срединными плоскостями соответственно передних и задних шин, а при сдвоенных колесах – между их серединами. Колея троллейбусов составляет около 2 м.

Базой четырехосного трамвая является расстояние между шкворнями передней и задней тележек (рис. 1.1, в), находится в пределах 7,5 м. *Базой тележки* называется расстояние между центрами колесных пар, находится в пределах 1,9 м.

Устройство и характеристика рельсового пути оказывает существенное влияние на выбор конструкции и работу механической части трамвая. Для трамваев, выпускаемых в СНГ, в качестве стандартной принята колея рельсового пути шириной 1524 мм на прямых участках пути.

Габаритная и полезная площади подвижного состава. Выбор числа мест для сидения и проезда стоя. Планировка салона. *Вместимость* подвижного состава называется общее количество мест для проезда сидя и стоя, определяемое при заданной планировке салона. Вместимость определяется как функция от числа сидений $z_{\text{сид}}$, площади $A_{\text{ст}}$ для проезда стоя и плотности наполнения салона. Вместимость является важнейшим показателем провозной способности подвижного состава. Она зависит от размеров кузова, планировки салона, расположения, числа и типа дверей, а также от соотношения площадей для сидящих и стоящих пассажиров. Наполняемость, или действительная загрузка салона, при движении подвижного состава изменяется в меньшую или большую сторону от вместимости при движении по маршруту.

Расчет начинается с определения габаритной площади подвижного состава. *Габаритная площадь* $A_{\text{габ}}$ подвижного состава – площадь по внешнему контуру кузова. Она включает в себя площади, занимаемые сидящими и стоящими пассажирами $A_{\text{пас}}$, кондукторами $A_{\text{конд}}$, подножками $A_{\text{п}}$, кабиной водителя $A_{\text{кв}}$, стенками кузова $A_{\text{стен}}$:

$$A_{\text{габ}} = A_{\text{пас}} + A_{\text{конд}} + A_{\text{п}} + A_{\text{кв}} + A_{\text{стен}}. \quad (1.1)$$

Под *полезной площадью* подвижного состава понимается сумма площадей салона, занятая пассажирами и проходами.

Площадь салона, занимаемая пассажирами:

$$A_{\text{пас}} = A_{\text{сид}} z_{\text{сид}} + A_{\text{ст}} z_{\text{ст}}, \quad (1.2)$$

где $A_{\text{сид}}$ – площадь, отводимая на одного сидящего пассажира: $A_{\text{сид}} = 0,315 \text{ м}^2/\text{пасс.}$;

$z_{\text{сид}}$ – число сидений в салоне ПС;

$A_{ст}$ – площадь, отводимая на одного пассажира для проезда стоя, $A_{ст} = 0,2 \text{ м}^2/\text{пасс.}$ (при $\alpha = 5 \text{ пасс./м}^2$ [8]).

Площадь, занимаемая кондукторами:

$$A_{МК} = A_k z_k, \quad (1.3)$$

где A_k – площадь, отводимая на одного кондуктора, $A_k = 0,5 \text{ м}^2$;

z_k – количество мест для размещения кондукторов.

При безкассовой форме оплаты (компостировании абонементных талонов) и для вагонов метрополитена $A_{МК} = 0$.

Площадь, занимаемая подножками, определяется из выражения

$$A_{п} = A_1 n_1 + A_2 n_2, \quad (1.4)$$

где n_1 и n_2 – количество одинарных и двойных дверей соответственно;

$A_1 = 0,4 \text{ м}^2$ и $A_2 = 0,7 \text{ м}^2$ – площадь подножек у одинарных и двойных дверей соответственно.

Для низкопольных конструкций подвижного состава и вагонов метрополитена $A_{п} = 0$.

Двери кузовов подвижного состава располагаются с одной или двух сторон таким образом, чтобы путь пассажира в салоне ПС средней вместимости не превышал 3–4 м, в шарнирно сочлененных – 2,5–3 м, в метрополитене – 2–2,5 м. В соответствии с действующими стандартами и РТМ (руководящими техническими материалами) трамвайные четырехосные вагоны с жестким кузовом должны иметь три двери, из них не менее двух двойных. Троллейбус с длиной кузова $L_k < 9 \text{ м}$ – две одинарные (шириной не менее 0,7 м в свету каждая), $L_k = 9–9,5 \text{ м}$ – две двойные (ширина не менее 1,4 м в свету каждая), $L_k = 10,5–11 \text{ м}$ – две двойные или две двойные и одну одинарную; $L_k = 11,5–12 \text{ м}$ – три двойные или две двойные и одну одинарную; сочлененные при $L_k = 16,5–18 \text{ м}$ – три двойные или три двойные и одну одинарную. Вагоны метрополитена должны иметь четыре двери с шириной дверного прохода в свету при открытых дверях не менее 1,208 м.

Площадь, занимаемую кабиной водителя, можно принимать равной $2,5 \text{ м}^2$ для троллейбусов и вагонов трамвая и 3 м^2 – для вагонов метрополитена.

Площадь, занимаемая стенками кузова:

$$A_{\text{стен}} = b_{\text{ст}} \Pi, \quad (1.5)$$

где $b_{\text{ст}}$ – толщина стенки кузова, принимаемая равной 0,055 м (0,9 мм – наружный лист; 1 мм – клей; 50 мм – квадратная труба; 3 мм – внутренний пластик) для троллейбуса и трамвая;

Π – внешний периметр кузова подвижного состава.

При решении планировочной задачи возникает проблема расположения сидений в пассажирском салоне. На подвижном составе применяется поперечное, продольное и смешанное расположения сидений. Продольные пассажирские сидения, как правило, выполняются многоместными, а поперечные – одно- и двухместными. Характерные варианты планировки пассажирских салонов отечественных и зарубежных троллейбусов, трамваев, метрополитена и монорельсовых дорог приведены на рис. 1.3.

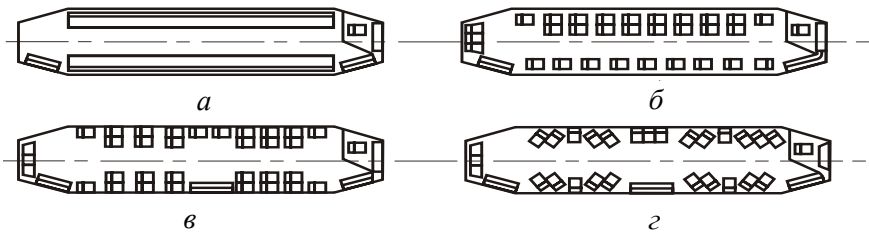


Рис. 1.3. Варианты расположения сидений: *a* – продольное; *б* – поперечное в три ряда; *в* – поперечное в четыре ряда; *г* – смешанное

При выборе размеров пассажирских сидений необходимо руководствоваться требованиями стандартов. Ширина одноместного сидения должна быть не менее 0,43 м, двухместного – 0,86 м, многоместного – кратной 0,43 м. Глубина сидения принимается равной 0,4 м. Зазор между сидением и стенкой кузова – 0,03 м. Шаг сидений – не менее 0,735 м. При планировке продольных диванов для ног пассажиров должна быть предусмотрена полоса шириной 0,1 м (рис. 1.4).

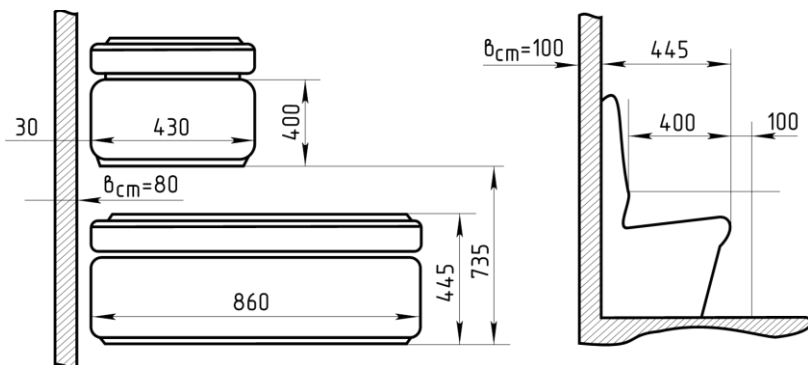


Рис. 1.4. Планировочные размеры пассажирских сидений

Чтобы наверняка подобрать число мест для сидения, запишем зависимость габаритной площади от числа мест для сидения:

$$A_{габ} = A_{стен} + A_{кв} + A_{конд} + A_{подн} + 0,34z_{сид} + 0,2(z_{пас} - z_{сид}). \quad (1.6)$$

Задаваясь числом мест для сидения, по выражению (1.6) строится график $z_{сид} = f(A_{габ})$. Однако по графику число мест для сидения можно определить лишь приближенно. Для точного определения решим выражение (1.6) относительно числа мест для сидения, получим

$$z_{сид} = 7,143(A_{габ} - A_{в.пл} - 0,2z_{пас}), \quad (1.7)$$

где $A_{в.пл}$ – вспомогательная площадь, $A_{в.пл} = A_{стен} + A_{кв} + A_{конд} + A_{подн}$.

Предложенное выражение (1.7) позволяет определить число мест для сидения при известной габаритной площади подвижного состава, его вместимости и в дальнейшем рассчитать как номинальную полную массу подвижного состава, так и в часы пик.

Выражение (1.7) позволяет решить и обратную задачу. Расставив требуемое число сидений в салоне подвижного состава при известной габаритной площади, можно определить число мест для проезда стоя, в том числе и в часы пик, т. е. определить вместимость подвижного состава. Для этого необходимо выражение (1.7) решить относительно числа пассажиров:

$$z_{пас} = 5(A_{габ} - A_{в.пл} - 0,14z_{сид}). \quad (1.8)$$

Пример 1.1. Определить число сидений для четырехосного трамвая с высоким уровнем пола, номинальной пассажировместимостью $z_{\text{пас}} = 140$ человек. Габаритная площадь трамвая $A_{\text{габ}} = 37,904 \text{ м}^2$; периметр кузова с сужением $\Pi_{\text{пс}} = 34,26 \text{ м}$; число двойных дверей – 3; в салоне работает кондуктор: $z_{\text{кон}} = 1$.

Р е ш е н и е

1. Определяем недостающие исходные данные для построения графика $z_{\text{сид}} = f(A_{\text{габ}})$ по выражению (1.6):

– площадь, занимаемая стенками кузова, $A_{\text{стен}} = 0,055 \cdot 34,26 = 1,884 \text{ м}^2$;

– площадь кабины водителя $A_{\text{кв}} = 2,5 \text{ м}^2$;

– площадь для кондукторов $A_{\text{конд}} = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ м}^2$;

– площадь, занимаемая подножками, $A_{\text{подн}} = 3 \cdot 0,7 = 2,1 \text{ м}^2$;

– вспомогательная площадь $A_{\text{в.пл}} = 1,884 + 2,5 + 0,5 + 2,1 = 6,984 \text{ м}^2$;

– число мест для проезда пассажиров стоя $z_{\text{ст}} = 140 - z_{\text{сид}}$.

2. Число сидений рассчитываем по выражению (1.7):

$$z_{\text{сид}} = 7,143(37,904 - 6,984 - 0,2 \cdot 140) = 20,858 \approx 21 \text{ шт.}$$

Результаты расчета показали, что на габаритной площади $A_{\text{габ}} = 37,904 \text{ м}^2$ при вместимости трамвая 140 пассажиров можно установить 20,858 сидений. Принимаем число мест для сидения $z_{\text{сид}} = 21$.

3. Для наглядности строим график по двум точкам, принимая величину габаритной площади 35 м^2 и 39 м^2 , рис. 1.5.

4. Тогда проехать стоя могут $z_{\text{ст}} = 140 - 21 = 119$ пассажиров, а площадь, занимаемая пассажирами, составит:

$$A_{\text{пас}} = 0,34 \cdot 21 + 0,2 \cdot 119 = 30,94 \text{ м}^2.$$

5. Значение расчетной габаритной площади:

$$A_{\text{габ,пас}} = 30,94 + 6,98 = 37,924 \text{ м}^2.$$

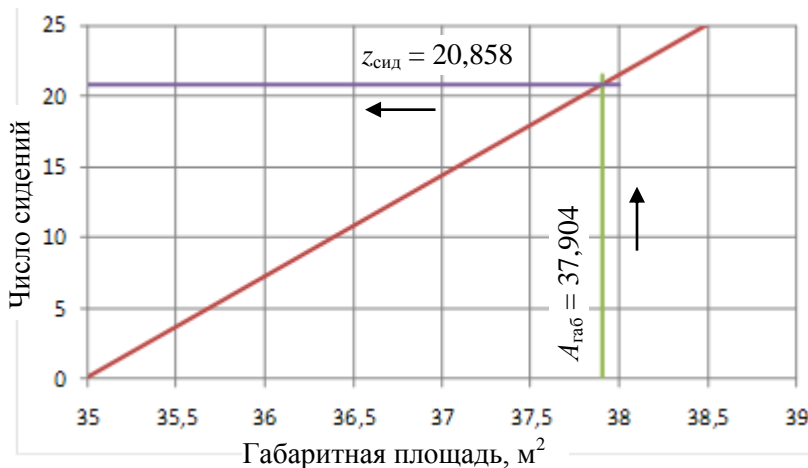


Рис. 1.5. Зависимость числа мест для сидения от габаритной площади

Решим обратную задачу: как изменится вместимость трамвая, имеющего габаритную площадь $37,904 \text{ м}^2$, в зависимости от числа сидений в салоне. Для решения этой задачи воспользуемся выражением (1.8). Минимальное число сидений примем равным 15 шт., наибольшее число сидений – 40 шт.

Для наглядности построим график $z_{\text{пас}} = f(z_{\text{сид}})$, рис. 1.6.

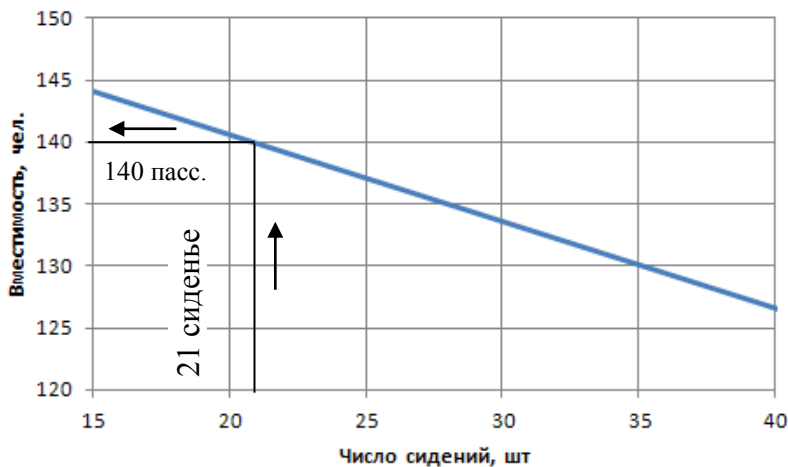


Рис. 1.6. Зависимость вместимости от числа мест для сидения при постоянной габаритной площади

Из рис. 1.6 видно, что с увеличением числа сидений в салоне от 15 до 40 вместимость трамвая линейно уменьшается с 144 чел. до 126 чел. при постоянной габаритной площади, равной 37,904 м².

Ответ. Отличие заданной габаритной площади от расчетной составляет 0,1 %, поэтому можно установить в салоне данного трамвая 21 сидение.

После определения габаритных размеров кузова подвижного состава, размещения ходовых частей, выбора типа и количества дверей приступают к планировке салона. В окончательном варианте вместимость спроектированного подвижного состава не должна отличаться от задания больше чем на ± 5 пассажиров.

1.3.3. Расход электрической энергии

При движении подвижного состава электроэнергия расходуется на преодоление основного и дополнительного (от уклонов, движения в кривых, сопротивление воздуха и т. п.) сопротивления движению; потери в тяговых электродвигателях, а также за счет под тормаживания в условиях уличного движения; вспомогательные нужды подвижного состава (производство сжатого воздуха, питание аппаратов и приборов цепей управления, освещение, отопление, сигнализацию и т. п.); собственные нужды тяговых подстанций, потери в преобразовательных агрегатах, в контактной и кабельной сетях и др. Энергия, расходуемая на движение подвижного состава, составляет около 80 % всей расходуемой энергии.

Расход электрической энергии, вызываемый движением подвижного состава в течение промежутка времени t_2-t_1 :

$$W = \int_{t_1}^{t_2} UI dt,$$

где U – напряжение;

I – ток;

UI – мощность, поглощаемая подвижным составом.

Расход электрической энергии на движение трамвая характеризуется показателем ее *удельного расхода*, который определяется выражением

$$\Delta W = \frac{W}{LG_{\text{пс}}},$$

где W – количество электроэнергии, израсходованное подвижным составом при прохождении участка длиной L ;

$G_{\text{пс}}$ – вес подвижного состава.

Удельный расход электроэнергии равен количеству электроэнергии, расходуемой на движение подвижного состава и его вспомогательные нужды, в кВт·ч на 1 км пройденного пути. Показатель удельного расхода электроэнергии в значительной степени влияет на экономические показатели подвижного состава, так как в общем балансе всех эксплуатационных расходов составляет до 20 %.

Удельный расход электроэнергии ориентировочно принимают на основе опытных данных, для троллейбусов находится в пределах 120–180 Вт·ч/т·км, для трамваев – 50–80 Вт·ч/т·км.

На линиях городского электрического транспорта ввиду большой частоты движения при сравнительно малой массе подвижного состава и в силу частого нарушения графика движения применяется приближенный аналитический метод учета расхода электроэнергии. Этот метод основан на замене действительных нагрузок условными с условным расположением их на линии. Наиболее распространенным методом учета расхода электроэнергии является метод равномерного распределения нагрузок.

Снижение расхода электроэнергии обеспечивается в основном конструктивными и эксплуатационными мерами. Сопротивление движению подвижного состава поглощает значительную часть расхода электроэнергии. Поэтому уменьшению сопротивления движению подвижного состава должно уделяться основное внимание. Большое влияние на сопротивление движению оказывает масса подвижного состава. Снижение массы на 1 % уменьшает расход электроэнергии на 0,6–0,7 %.

Сопротивление воздушной среды во многом зависит от формы кузова подвижного состава. Придание ему обтекаемой формы и ликвидация выступающих частей сокращает сопротивление движению, особенно трамвая, а следовательно и расход электроэнергии.

Снижение потерь в электродвигателях, системах управления электродвигателями, трансмиссии, движителе, тормозной системе

и тому подобном играет также немаловажную роль в снижении потребления электроэнергии. Так, применение тиристорно-импульсных систем управления тяговым электродвигателем может экономить до 30 % потребляемой энергии по сравнению с использованием контактно-резисторной системы управления. Кроме того, большое значение имеет правильный выбор требуемой мощности тягового электродвигателя, повышение эффективности тормозных свойств и динамических показателей (ускорения, замедления, скорости движения и др.). Большой эффект в снижении расхода электроэнергии оказывает применение рекуперативного торможения подвижного состава городского электрического транспорта. При рекуперативном торможении часть энергии может возвращаться обратно в электрическую сеть. Снижение расхода электроэнергии при этом доходит до 20 %.

Рациональное проектирование маршрутов подвижного состава может значительно снизить дополнительное сопротивление движению за счет уменьшения продольных уклонов, сокращения количества и протяженности кривых участков, а также увеличения радиусов кривых.

К эксплуатационным мероприятиям по снижению расхода электроэнергии относятся в первую очередь меры по уменьшению сопротивления движению за счет поддержания в образцовом техническом состоянии подвижного состава, дорожного полотна и рельсового пути. Большое значение придается применению рациональных приемов вождения подвижного состава, выраженное в более полном использовании кинетической энергии, получении максимального выбега, устранении лишних пусков и подтормаживаний на перегоне.

Улучшение организации и регулирования уличного движения играет очень большую роль в экономии энергии на транспорте. Уменьшение количества перекрестков, вызывающих задержки и простои транспорта, сокращение продолжительности простоев у светофоров, устранение помех в движении транспорта на перегонах, создание максимально возможных условий для непрерывного движения маршрутного общественного транспорта, в том числе и выделение для него специальных полос движения, и другие меры, служащие для уменьшения расхода энергии, одновременно повышают качество транспортного обслуживания населения городов.

1.3.4. Технические показатели городского пассажирского транспорта

Обоснованный выбор того или иного городского пассажирского транспорта может быть осуществлен лишь сопоставлением конкурирующих видов в системе сравнительных показателей. Одним из основных технических показателей является *скорость движения транспорта*. При этом различают следующие скорости:

– конструктивная скорость $v_{\text{кон}}$ – максимальная скорость, которая может быть развита транспортом на горизонтальном прямом участке дороги (рельсового пути) в соответствии с динамическими характеристиками подвижного состава и его конструктивными особенностями. Конструктивная скорость современного подвижного состава достигает 60–75 км/ч;

– предельная допустимая скорость $v_{\text{пред}}$, как правило, меньше конструктивной скорости и определяется правилами дорожного движения. По действующим правилам движение транспорта в городе разрешается со скоростью не больше 60 км/ч. На некоторых участках дорог и улиц разрешенная скорость может быть повышена при наличии соответствующего дорожного знака;

– установившаяся скорость $v_{\text{уст}}$ – максимальная равномерная скорость, с которой движется транспортное средство на перегоне между двумя смежными остановочными пунктами. Величина ее зависит не только от динамических характеристик подвижного состава, но и от длины перегона и условий движения на линии;

– ходовая скорость $v_{\text{ход}}$ – средняя скорость движения, определяемая как частное от деления расстояния между смежными остановками на время движения между ними. Величина ходовой скорости, как и установившейся, зависит от динамических свойств подвижного состава и от расстояния между остановочными пунктами. Кроме того, существенное влияние на нее оказывает интенсивность транспортного движения и организация уличного движения, наличие пересечений, продольный профиль и состояние дороги (рельсового пути);

– *скорость сообщения* $v_{\text{сообщ}}$ представляет собой среднюю величину, определяемую отношением пройденного подвижным составом пути к суммарной затрате времени на движение, плановые остановки и внеплановые задержки:

$$v_{\text{сообщ}} = \frac{s}{t_x + t_{\text{план.з}} + t_{\text{непл.з}}},$$

где s – длина пройденного пути;

t_x , $t_{\text{план.з}}$, $t_{\text{непл.з}}$ – время, затраченное соответственно на движение, плановые и неплановые задержки.

Скорость сообщения является важнейшим показателем, так как она определяет фактические затраты времени пассажира на поездку. На величину скорости сообщения оказывают влияние условия движения, размер пассажирообмена на остановочных пунктах, интенсивность транспортного потока и т. п. Колебание величины скорости сообщения в зависимости от времени года достигает 7 %, а по времени суток – 11 %. Наибольшая скорость сообщения в течение суток наблюдается в начале и конце движения, а наименьшая – в часы вечернего максимума. Чем больше размеры города, а следовательно, чем на большее расстояние перемещаются пассажиры, тем выше должна быть и скорость сообщения. Усредненное фактическое значение скорости сообщения для городского транспорта составляет 10–15 км/ч.

Эксплуатационная скорость v_o , определяется отношением пройденного пути к суммарной затрате времени, включающей затраты времени на движение, плановые остановки и внеплановые задержки, а также на оборот подвижного состава на конечных пунктах. Эксплуатационная скорость определяется или на отдельно взятом маршруте, или как средняя величина для всей маршрутной системы:

$$v_o = \frac{3,6s}{t_x + t_o + t_d + t_{об}}, \text{ км/ч,}$$

где $t_{об}$ – затрата времени на оборот подвижного состава на конечных пунктах.

Если скорость сообщения является одним из основных показателей, характеризующих затраты времени пассажира на передвижение, то эксплуатационная скорость определяет качество работы транспорта в целом и организацию движения транспорта на линиях. Чем быстрее на маршрутах оборачиваются подвижные составы, тем меньше их требуется для выполнения определенного объема пере-

возок. Наряду с другими показателями эксплуатационная скорость определяет количество предоставляемых местокилометров для перевозки пассажиров и в конечном счете себестоимость пассажирских перевозок, так как большая часть расходов транспортного предприятия обратно пропорциональна величине эксплуатационной скорости.

Кроме того, эксплуатационная скорость при заданном объеме транспортной работы влияет на необходимое количество подвижного состава и, как следствие, на размер транспортного парка и количество занятого персонала.

Между эксплуатационной скоростью и скоростью сообщения существует зависимость:

$$v_э = v_{\text{сообщ}} \frac{t_x + t_o + t_d}{t_x + t_o + t_d + t_{\text{об}}}$$

Практически в зависимости от длины маршрута и других условий, эксплуатационная скорость равна:

$$v_э = \frac{v_{\text{сообщ}}}{1,10 \dots 1,15},$$

следовательно, эксплуатационная скорость на 10–15 % ниже скорости сообщения.

Пропускная способность транспортных линий определяется максимальным количеством транспортных единиц, которые могут быть пропущены через какое-либо сечение линий в течение часа в одну сторону при соблюдении условий нормальной эксплуатации и требований безопасности движения. При движении подвижного состава с периодическими плановыми остановками пропускная способность линии определяется пропускной способностью остановочного пункта с наибольшим пассажирообменом.

В общем виде пропускная способность определяется по остановочному пункту и имеет вид:

$$N_o = \frac{3600}{T_o} = \frac{3600}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4},$$

где T_0 – общая продолжительность занятия транспортной единицей остановочного пункта;

t_1 – время, затрачиваемое транспортным средством на подход к остановочному пункту;

t_2 – время, затрачиваемое на посадку и высадку пассажиров;

t_3 – время, затрачиваемое на подачу сигналов и закрытие дверей,
 $t_3 = 3-4$ с;

t_4 – время, затрачиваемое на освобождение остановочного пункта.

В свою очередь отдельные слагаемые определяются следующим образом:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2l}{b}}; \quad t_4 = \sqrt{\frac{2l}{a}},$$

где l – расстояние безопасности между транспортными единицами при подходе к остановочному пункту и отходе от него, принимаемое равным длине транспортной единицы;

b – служебное замедление;

a – ускорение.

$$t_2 = \frac{\rho \Omega t_0}{n},$$

где ρ – коэффициент, учитывающий долю входящих и выходящих пассажиров от нормальной вместимости (для остановочного пункта с большим пассажирообменом $\rho = 0,2$);

Ω – вместимость подвижного состава;

t_0 – время, затрачиваемое одним пассажиром на вход и выход ($t_0 \approx 1,5-2,0$ с);

n – количество дверей.

Пропускная способность двери массового уличного транспорта в зависимости от вместимости подвижного состава находится в пределах от 60 до 120 пасс./ч.

Пропускная способность линии при условии непрерывного движения (без остановочных пунктов и пересечений) определяется исходя из минимально допустимых интервалов следующих друг за другом транспортных единиц. Интервалы должны обеспечивать

возможность торможения и остановки подвижного состава при внезапной остановке впереди идущего:

$$N_{\text{л}} = \frac{3600v}{t_{\text{p}}v + (s_{\text{T}}'' - s_{\text{T}}') + l_{\text{д}} + l_{\text{з}}},$$

где t_{p} – время реакции водителя;

$s_{\text{T}}'' - s_{\text{T}}'$ – разность тормозных путей передней и задней машины;

$l_{\text{д}}$ – длина транспортной единицы;

$l_{\text{з}}$ – длина участка безопасности между машинами после остановки.

Пропускная способность полосы проезжей части на перекрестке со светофорным регулированием определяется режимом регулирования и может быть рассчитана по формуле

$$N_{\text{п}} = \frac{3600(t_{\text{с}} - t_{\text{к}})}{t_{\text{п}}T_{\text{п}}}, \text{ ед. ч.},$$

где $t_{\text{с}}$ – продолжительность зеленой фазы светофора;

$t_{\text{к}}$ – отрезок времени между включением зеленого сигнала светофора и пересечением «стоп-линии» передней машиной;

$t_{\text{п}}$ – средний интервал прохождения транспортного средства через перекресток;

$T_{\text{п}}$ – продолжительность цикла регулирования.

Провозная способность транспортных линий определяется максимальным количеством пассажиров, которое может быть перевезено в течение одного часа в одном направлении:

$$n = N_{\text{o}}\Omega, \text{ пасс./ч.}$$

Для текущих расчетов в условиях нехватки подвижных составов их вместимость принимается из условия размещения 5 чел., а в часы пик – 8 стоящих пассажиров на 1 м² свободной площади пола салона. Следует отметить, что подобное наполнение пассажирами салона не обеспечивает удобство поездки. Поэтому в перспективных расчетах рекомендуется к любым видам массового пассажир-

ского транспорта применять меньшую норму наполнения салона – 3 чел. на 1 м² свободной площади. При такой норме в обычное время работы транспорта всем пассажирам могут быть предоставлены места для сидения, а в часы пик некоторая часть пассажиров будет ехать стоя в нормальных условиях, сохраняя свободу передвижения внутри салона.

1.4. Комфортабельность и безопасность подвижного состава

1.4.1. Основные понятия и определения

К общественному пассажирскому транспорту предъявляются высокие требования в отношении удобства, комфорта и безопасности для пассажиров и обслуживающего персонала. Степень представляемых пассажирам удобств при сравнительной оценке существующих и проектируемых видов подвижного состава характеризуется обобщенным параметром, который называется *комфортабельностью*. Различают динамическую и статическую комфортабельность.

Динамическая комфортабельность – уровень комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала во время движения подвижного состава. В числе ее показателей – показатели плавности хода, уровень шума снаружи и внутри пассажирского салона. Уровень шума снаружи подвижного состава определяет его шумовое воздействие на пешеходов и жителей прилегающих районов, т. е. на уровень шума в городе. Уровень шума внутри салона – на пассажиров и обслуживающий персонал.

Статическая комфортабельность – уровень комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала независимо от движения подвижного состава, а также эстетико-художественное соответствие подвижного состава городской застройке, ее архитектурным принципам и планировке. К показателям статического комфорта относятся: наружный дизайн подвижного состава, удобства посадки и высадки, качество отделки и размеры сидений, пассажирского салона и его оборудования, кабины водителя, освещенность и вентиляция салона и кабины водителя, наличие информационного табло.

Безопасность подвижного состава оценивается следующими показателями:

- безопасность нормальной посадки и высадки пассажиров и обслуживающего персонала на остановках;
- безопасность пассажиров, обслуживающего персонала и пешеходов в нормальных режимах эксплуатации подвижного состава;
- безопасность пассажиров и обслуживающего персонала в аварийных ситуациях, например при столкновении с другими видами транспорта;
- противопожарная безопасность пассажиров и обслуживающего персонала;
- безопасность при обслуживании и выполнении ремонтных работ.

1.4.2. Шум и вибрации

Для конструкторов крайне важно оценить на стадии проектирования акустические качества подвижного состава. Снижение уровня шума идет по трем направлениям:

- обнаружение источника и снижение его шума;
- изоляция источника шума;
- поглощение шума (шумопоглощение).

Кроме колебаний подрессоренных и неподресоренных масс, обусловленных взаимодействием колесного движителя с неровностями опорной поверхности при движении подвижного состава, возникает и вибрация отдельных элементов его шасси и кузова в диапазоне частот от единицы до нескольких тысяч герц. Причинами возбуждений вибрации кроме сил, возникающих при взаимодействии колес с опорной поверхностью, являются колебания, сопровождающие рабочие процессы элементов шасси и аэродинамические силы.

Возникновение вибрации ухудшает комфортабельность, может вызвать неприятные ощущения, преждевременное утомление и снижение производительности труда, повышенные напряжения в некоторых элементах кузова и шасси. Особенно вредными являются создаваемые вибрациями шумы как внутри, так и снаружи салона.

Если уровень шума превышает определенный предел, то происходит перегрузка нервной системы человека, в результате чего повышается функциональная активность нервных структур головного мозга, ослабляется внимание и память, снижается точность действий и быстрота реакции человека. Источниками шума и вибрации являются:

- неуравновешенность вращающихся частей и крутильные колебания тягового электродвигателя и трансмиссии;
- неуравновешенность, деформация и износ карданной передачи, колес;
- работа компрессора и тормозов;
- прогиб элементов кузова под влиянием изгибных, крутильных или инерционных нагрузок;
- недостаточно жесткое крепление окон и дверей.

Слуховые ощущения у человека возникают только в определенной области частот. Нижний предел – 16 колебаний в секунду (16 Гц), верхний – 22 000 Гц. Кроме того, возникновение слуховых ощущений возможно только тогда, когда интенсивность звука достигает некоторого минимума, различного для разных тонов. Уровень звуковых давлений внутри салона состоит из двух основных слагаемых звуковой вибрации: шума, создаваемого собственными источниками, и шума, проникающего снаружи звукового поля, зависящего от звукоизоляции салона.

Уровень интенсивности звука определяют по звуковому давлению. Чтобы уровень давления соответствовал уровням интенсивности, в качестве порогового уровня звукового давления принято значение $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Н/м², соответствующее порогу интенсивности 10 Вт/м². Предельная величина уровня звукового давления, не вызывающего нарушение слуха, оценивается в 100 дБ. Допустимые уровни внешнего и внутреннего шума регламентируются ГОСТ 27436-87 и ГОСТ 27435-87 (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Допустимые уровни шума

Транспортные средства	Внешний шум, дБ	Внутренний шум, дБ
Автомобили:		
– легковые	82	80
– грузовые	89–91	84
Автобусы	89–91	82

Наибольшее значение имеет шумоизоляция тягового электродвигателя, источником шума которого являются вентиляция, вибрация

вращающейся части электродвигателя, подшипников и щеток. Сложность шумоизоляции тягового электродвигателя обусловлена тем, что высота уровня пола лимитируется.

Вибрации панелей кузова дают низкочастотный шум, а дребезжание окон, дверей и других элементов кузова – крайне неприятный высокочастотный шум. Эти вибрации могут резонировать с колебаниями от тягового электродвигателя и трансмиссии. Дребезжание элементов кузова должно быть исключено при любом состоянии износа сменных или регулируемых уплотнений.

В пассажирском салоне подвижного состава шум образует акустическую систему, связанную с воздушным объемом салона, размерами панелей, наличием сидений и другого оборудования кузова, числа пассажиров. Для его уменьшения в салоне подвижного состава желательно иметь мягкую обивку панелей, применять перфорированный (до 20 % площади перфорации) картон или другой материал для обивки потолка, настилать на пол резиновые коврики.

Следует иметь в виду, что плоская крыша подвижного состава обладает лучшими звукопоглощающими свойствами по сравнению с глубоководной, которая фокусирует звуки. При этом необходимы меры предупреждения возникновения вибраций, которые должны быть исключены или хотя бы сведены к минимуму.

1.4.3. Удобства поездки, входа и выхода пассажиров

Удобство поездки – совокупный показатель, который определяется затратой времени на передвижение, удобством посадки и выхода, регулярностью движения, а также комфортом в салоне подвижного состава. Затраты времени на передвижение зависят в большей степени от скорости сообщения. По удобству посадки и выхода в наихудшем положении по отношению к другим видам пассажирского транспорта находится трамвай, так как посадка и выход пассажиров осуществляется на проезжей части улицы.

Удобство и безопасность входа и выхода определяется высотой, глубиной и числом ступенек, их освещенностью, состоянием поверхности, расположением поручней, шириной дверного проема, конструкцией дверей и наличием специальных предохранительных устройств. Обычно для городского пассажирского транспорта характерны сравнительно короткие поездки пассажиров и быстрота

их входа и выхода. Отсюда стремление к снижению уровня пола в салоне подвижного состава. В современном подвижном составе уровень пола находится в пределах 320–520 мм, в то время как у обычного подвижного состава он находится на уровне 650–825 мм и имеет, как правило, три ступеньки высотой 200 мм. По глубине ступеньки должны быть не менее 280 мм, а подножка – не менее 300 мм.

Ширина дверного проема в свету для одинарной двухстворчатой двери регламентируется в пределах 535–800 мм; для двойной четырех- и трехстворчатой двери – 900–1400 мм и более.

Поручни у дверей располагают так, чтобы они были достигаемы для входящего пассажира с тротуара и для пассажира, стоящего на выходной площадке в салоне. При сдвоенных дверях кроме боковых поручней желательно иметь центральный поручень, разделяющий дверной проем. Высота дверного проема должна быть не менее 1900 мм.

Удобство прохода пассажиров в салоне определяется его планировкой. Ширина прохода при четырехрядном расположении сидений недостаточна, отсюда стремление к трехрядной планировке. При ширине прохода 940–1060 мм можно обойти стоящих пассажиров, т. е. удобство прохода достигается за счет уменьшения числа сидений, что несколько снижает комфорт проезда. Удобство и безопасность стоящих пассажиров обеспечивается ровностью пола, его покрытием, высотой салона и расположением поручней.

Наличие порогов в салоне представляет собой потенциальную опасность: пассажир может оступиться, споткнуться или быть прижатым к порогу. Наличие пандусов с уклоном более 3 % создает неустойчивое положение для стоящих пассажиров, особенно при перемещении его по пандусу, местные подъемы пола под сидениями также создают неудобства.

Сидения для подвижного состава выполняют жесткими, полужесткими и мягкими с низкой спинкой без регулировки, обеспечивающими вполне приемлемую комфортабельность при кратковременных поездках. Форма подушки и спинки сидения должны создавать наибольшую и удобную опорную поверхность для тела человека. Сидение водителя должно регулироваться по высоте и в продольном направлении, включая наклон спинки. Размещение контрольных элементов управления и измерительных приборов должно быть спроектировано с учетом нормативных требований.

1.4.4. Микроклимат пассажирского салона

Одним из основных факторов, определяющих комфортабельность подвижного состава, является обеспечение в салоне микроклимата, наиболее благоприятного для самочувствия пассажиров и водителя. Воздух в салоне подвижного состава загрязняется пылью, проникающей снаружи и поднимающейся с пола. В нем присутствуют отработанные газы автомобилей, влага и другие компоненты, проникающие в салон через щели люков, дверей, окон. Не всегда благоприятна в салоне и температура. В среднем запыленность воздуха в крупных городах составляет $0,8\text{--}1,6 \text{ мг/м}^3$, в индустриальных городах она достигает $1,6\text{--}3,0 \text{ мг/м}^3$. Для нетоксичной пыли, содержащей частицы кварца, допустимая ее концентрация составляет $2,0 \text{ мг/м}^3$, для всех других видов пыли – до 10 мг/м^3 .

Кроме того, пассажиры сами являются некоторым источником загрязнения воздушной среды салона. Так, условно принимается, что один пассажир выделяет $110\text{--}120 \text{ ккал/ч}$ тепла, $40\text{--}250 \text{ г/ч}$ влаги и $20\text{--}30 \text{ л/ч}$ углекислоты. Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе салона не должна превышать нормативных значений: двуокиси углерода – $0,4 \%$, окиси углерода – $0,02 \text{ мг/л}$, акролеина – $0,007 \text{ мг/л}$, паров серной кислоты – $0,001 \text{ мг/л}$, пыли – $0,0005 \text{ мг/л}$. Уменьшение степени загрязнения воздуха в салоне достигается изоляцией агрегатов шасси, приспособленностью пола и всего салона для удаления пыли, мойки и вентиляции.

Микроклимат салона подвижного состава характеризуется температурой, влажностью воздуха и скоростью воздушных потоков. *Температура воздуха* в салоне оценивается разностью температур воздуха на уровне ног и головы пассажиров, разностью температур наружного воздуха и воздуха в салоне летом и зимой, изменением температуры в салоне по времени. Температурное ощущение определяется совокупным воздействием на человека температуры окружающего воздуха и стенок кузова, влажностью воздуха и скоростью воздушных потоков. Тепло, поступающее через систему отопления, должно равномерно распределяться по всему объему салона. Минимальная температура на уровне пола около дверей не должна быть менее $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость движения воздуха в салоне рекомендуется летом не более $0,5 \text{ м/с}$, а зимой – $0,2 \text{ м/с}$.

Разность температур воздуха на уровне пола и головы сидящего пассажира в зимних условиях допускается 4–9 °С. Для летних условий эта разность может равняться 3–5 °С. Источником тепла в салоне могут быть: наружный воздух, солнечная инсоляция, система отопления, тяговый электродвигатель, тормозная система и сами пассажиры. В летний период при температуре окружающего воздуха 25–30 °С тепловыделение одного пассажира принимается равным 110 ккал/ч, а температура внутренних панелей может превышать 40 °С.

Солнечная инсоляция¹ значительно влияет на нагрев воздуха салона и находится в прямой зависимости от суммарной площади остекления кузова. В зависимости от площади остекления применяются детермальные² или окрашенные стекла, совершенствуется теплоизоляция крыши и боковых панелей кузова.

Вентиляционные системы подвижного состава классифицируются следующим образом:

- естественная вентиляция (организованная и неорганизованная);
- принудительная вентиляция;
- совмещенная – естественная и принудительная;
- кондиционирование воздуха.

Естественно организованная вентиляция осуществляется за счет открывающихся форточек и специальных вентиляционных люков, расположенных на крыше кузова. В зависимости от аэродинамического давления на поверхность движущегося подвижного состава, часть форточек и люков являются нагнетательными, а другая часть – вытяжными. Количество подаваемого в салон воздуха при естественной вентиляции зависит от скорости движения подвижного состава. Учитывая, что скорость движения на некоторых участках маршрута мала и присутствуют частые остановки, естественная вентиляция не может обеспечить полноценного обмена воздуха. Наиболее эффективной в таких условиях является система *вентиляции совмещенного типа* (естественная и принудительная). Наилучшим решением вентилирования салона является *применение кондиционирования воздуха* с автономным источником энергии привода

¹ Облучение поверхностей солнечным светом (солнечной радиацией).

² Стекла, обладающие теплоотражающими свойствами. Иногда их называют атермальными. Как правило, такие стекла тонируют.

компрессора и вентилятора. Система кондиционирования воздуха представляет собой установку, автоматически поддерживающую в замкнутом объеме салона заданную температуру и влажность воздуха. Система полного кондиционирования обеспечивает охлаждение и фильтрацию воздуха, удаление из него влаги, поддержание температуры и влажности воздуха в наиболее благоприятных пределах.

В подвижном составе городского электрического транспорта наиболее распространены системы отопления, в которых используется тепло, выделяемое системой управления тяговым электродвигателем, или отопление электрическими печами, расположенными под сидениями. Суммарная производительность тепла системы отопления для подвижного состава длиной 11–15 м составляет 20 000–40 000 ккал/ч.

Рабочее место водителя обогревается воздухом с регулируемой температурой, причем теплый воздух подается снизу и окружает водителя со всех сторон. Оптимальные для работы водителя условия создаются при температуре окружающего воздуха 18 °С. При температуре 25 °С и выше работоспособность водителя снижается на 40 % и более. Температура воздуха ниже 18 °С затрудняет работу водителя, а местное резкое охлаждение может вызвать его заболевание.

Интенсивность нагрева воздуха салона при заданной внешней температуре является функцией производительности системы отопления, теплоустойчивости кузова и инфильтрации воздуха³. Поэтому кроме увеличения производительности отопительной системы для повышения интенсивности нагрева и температуры воздуха салона необходимо совершенствовать теплоизоляцию кузова и улучшать ее герметичность.

1.4.5. Обзорность и освещенность салона

Обзорность с рабочего места водителя должна соответствовать нормативным требованиям. Стекла ветрового окна кабины должны быть полированными, трехслойными, не распадаться на ранившие осколки при повреждении. Они не должны ухудшать видимость и искажать предметы, находящиеся в поле зрения водителя. Стекла

³ Перемещение воздуха через ограждающие конструкции из окружающей среды в помещение за счет ветрового или теплового напора, формируемого за счет разности температур или перепадов давления воздуха снаружи и внутри помещения.

ветрового окна для устранения запотевания и обмерзания должны обогреваться при низкой наружной температуре, а при осадках в виде дождя и снега – очищаться двумя (и более) стеклоочистителями.

Кабина водителя снабжается зеркалами или оптической системой, обеспечивающей с места водителя видимость следующих зон:

- левая сторона подвижного состава и дорога сзади него;
- правая сторона подвижного состава и дорога сзади него;
- правая и левая части салона;
- кромка тротуара или посадочной площадки у правого борта подвижного состава.

Кроме того, кабина водителя оборудуется непрозрачным противосолнечным козырьком или шторкой с регулировкой их положения в пределах, достаточных для защиты глаз водителя от прямых действий солнечных лучей.

Обзорность для пассажиров, сидящих и стоящих в салоне, необходима для ориентации по маршруту движения, лучшей видимости без искажения окружающего ландшафта, раздражающих помех и для уменьшения утомляемости. Она определяется площадью остекления кузова, высотой и шириной оконных проемов, расположением сидений, отсутствием помех от оконных рам.

Освещенность салона в дневное время определяется площадью остекления кузова. Иногда за критерий освещенности принимают площадь остекления кузова, отнесенную к площади пола салона. В темное время суток освещенность салона обеспечивается искусственным освещением, обычно люминесцентными лампами. Причем освещенность на высоте 1 м от пола должна быть не менее 75 лк. Обязательно предусматривается освещенность дверных проемов, подножек и прилегающих участков тротуара или посадочной площадки на остановках во время посадки и высадки пассажиров.

В кабине водителя устанавливается отдельный плафон и обеспечивается постоянное освещение контрольных приборов, которое должна быть не менее 3–5 лк.

Подвижной состав оборудуется наружными световыми приборами (фарами, указателями поворотов, габаритными огнями, сигналами торможения и т. д.) в соответствии с «Правилами дорожного движения».

Цветовые композиции воздействуют на эмоции человека: они способны успокаивать, утомлять, раздражать, возбуждать и угнетать.

Поэтому созданию «цветового климата» в интерьере салона уделяется соответствующее внимание. Каждый пассажир воспринимает по-разному цветовые сочетания, однако существует деление цветов по признаку наиболее часто встречающихся ассоциаций относительно отдельных спектров. При этом психологическое воздействие цветов зависит от положения человека в пространстве. Проектирование и цветовое оформление интерьера салона рассматривается как творчество художника, а его результат – как художественное произведение, где могут быть найдены и применены неожиданные решения.

1.4.6. Безопасность

Безопасность подвижного состава рассматривается как активная безопасность (безопасность движения) и пассивная безопасность (безопасность салона).

Активная безопасность обеспечивается совокупностью конструктивных, технологических и организационных мероприятий и включает в себя комплекс вопросов, связанных с движением подвижного состава в городском транспортном потоке: безопасность водителя и пассажиров, других транспортных средств, движущихся в общем транспортном потоке, а также пешеходов. Активная безопасность связана с эффективностью торможения, устойчивостью прямолинейного и криволинейного движения, управляемостью, эффективностью освещенности дороги (рельсового пути), отсутствием ослепляемости, предупредительной звуковой и световой сигнализацией, хорошей обзорностью с рабочего места водителя.

Пассивная безопасность включает в себя комплекс вопросов безопасности пассажиров и обслуживающего персонала на стоянке подвижного состава, при его движении и в аварийной ситуации (столкновение, опрокидывание, занос, пожар).

Пассивная безопасность на стоянке связана с выходом и входом пассажиров и определяется высотой, числом и конструкцией ступенек, наличием и расположением поручней, шириной двери и др.

Несчастные случаи могут происходить при движении пассажиров в дверных проемах, при плохом устройстве посадочных мест (теснота, плохое освещение и т. д.). Для обеспечения безопасности пассажиров водитель должен иметь возможность наблюдать за входом и выходом. В конструкциях привода управления дверьми пре-

дусматриваются предохранительные устройства, не допускающие движение подвижного состава при открытой двери или при защемлении створками двери пассажира. Наибольшее число несчастных случаев относится ко времени пиковых нагрузок, при резком замедлении, поворотах, проезде через неровности. Во всех этих случаях возникают продольные, поперечные, угловые и вертикальные ускорения. Предельные значения ускорений по условиям безопасности движения представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Предельные значения ускорений

Положение пассажиров		Ускорение, м/с ²			
		вертикальное	при разгоне	при торможении	угловое продольное, поперечное
Стоя	свободно держась за поручни	3	0,5	0,8	–
		10–30	1	1,2 – 2,0	–
Сидя	свободно держась за поручни	10–30	1,2	4–6	5,7–9,6
		10–30	1,8*	свыше 6	–

* при наличии подлокотников

Пассивная безопасность в аварийной ситуации зависит от конструкции подвижного состава, особенно его кузова, оборудования и уровня травмобезопасности отделки салона. По влиянию на человека все аварийные ситуации рассматриваются как возникающие в случае лобовых столкновений, ударов в борт или сзади, опрокидывания, заносов, пожара.

Весь подвижной состав должен иметь прочные конструктивные элементы, расположенные на высоте бамперов автомобилей. В салоне не должно быть элементов, имеющих острые кромки или закругления малого радиуса. Стекла в окнах должны оставаться на месте даже после сильного удара головой или плечом пассажира. Кузов должен быть выполнен в виде жесткой пространственной системы, обладающей высоким сопротивлением изгибу, скручиванию и различным ударам. Особое внимание уделяется конструкции шпан-

гоутов и прочности крыши. При опрокидывании каркас кузова должен сохранять форму при минимальной деформации.

Угроза пожара, как и сам пожар, могут возникнуть на стоянке, при движении и при авариях. Особенности конструкции кузова должны учитывать эти возможности и предусматривать рациональное размещение и удобство пользования огнетушителями (подвижной состав должен иметь огнетушители, один из которых находится в кабине водителя), возможность быстрой эвакуации пассажиров. К противопожарным конструктивным мероприятиям относятся применение трудновоспламеняемых материалов и надежная изоляция тягового электродвигателя от салона. Быстрая эвакуация пассажиров при пожарной опасности гарантируется шириной дверного проема и проходов, наличием нескольких дверей, числом и высотой ступенек, возможностью эвакуации через окна. Конструкция кузова подвижного состава может включать до пяти аварийных выходов для эвакуации пассажиров в случае необходимости.

Для обеспечения противопожарной безопасности в салоне и кабине водителя предусматривается система пожарной тревоги. Кроме того, салон оборудуется информационной системой, основанной на использовании микроЭВМ, которая включает внутренний телефон, экстренную связь, а также визуальные информационные дисплеи. Внешние дисплеи в обоих концах пассажирского салона и на дверях показывают назначение и номер маршрута. Внутренние дисплеи, расположенные над проходами, указывают текущее положение подвижного состава.

Контрольные вопросы

1. Нормативные требования к перевозке пассажиров городским транспортом. Как влияет поездка в городском транспорте на производительность работника?

2. Почему городской электрический транспорт является наиболее «чистым» в экологическом отношении? Какой из видов городского транспорта имеет наибольшую провозную способность?

3. Оцените примерные провозные способности автобуса, электробуса (троллейбуса) и трамвая. Назовите преимущества применения сочлененных троллейбусов и трамваев. Назовите преимущества автономного электрического транспорта?

4. Какие требования предъявляются к городскому транспорту? Назовите общие признаки классификации подвижного состава городского транспорта.

5. Назовите основные оценочные показатели подвижного состава. Как примерно распределяется вес двухосного троллейбуса по осям и вес четырехосного трамвая по его тележкам?

6. Габариты подвижного состава, ограничения на габариты. Планировка салона подвижного состава. Определение числа сидений в салоне.

7. Показатели расхода электроэнергии подвижным составом. Примерные значения расхода электроэнергии троллейбусами и трамваями.

8. Назовите основные технические показатели подвижного состава городского транспорта. Пропускная способность маршрута.

9. Назовите основные показатели комфорта и безопасности подвижного состава, критерии и нормы их оценки.

10. Противопожарная безопасность подвижного состава, ее составляющие.

2. ГОРОДСКИЕ ДОРОГИ И РЕЛЬСОВЫЕ ПУТИ

2.1. Классификация и элементы городских улиц и дорог

Улицей называется полоса территории города, ограниченная застройкой и предназначенная для движения транспорта и пешеходов. Городские дороги служат для движения транспорта между обособленными районами города, а также для связи улиц с загородными дорогами и для объезда города транзитным транспортом. Городские транспортные площади являются узловыми пунктами городского движения, их располагают на пересечениях и слияниях магистральных улиц. На них происходит сосредоточение и распределение транспортных потоков по основным направлениям движения в городе.

Автомобильная дорога – комплекс конструктивных элементов, предназначенных для движения с установленными скоростями, нагрузками и габаритами автомобилей и иных наземных транспортных средств, осуществляющих перевозки пассажиров или грузов, а также участки земель, предоставленные для их размещения. *Категория дороги (проектная)* – критерий, характеризующий значение автомобильной дороги в общей транспортной сети страны и определяемый интенсивностью движения на ней. В соответствии с категорией назначаются все технические параметры дороги.

К улицам и дорогам предъявляют требования с учетом условий и интенсивности движения по ним транспорта. Чем выше их категория или группа, тем выше предъявляемые к ним требования (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Категории автомобильных дорог общего назначения

Категория дороги	Расчетная интенсивность движения, авт/сут		Народнохозяйственное и административное значение автомобильных дорог
	приведенная к легковому автомобилю	в транспортных единицах	
1	2	3	4
I-a	свыше 14 000	свыше 7000	Магистральные автомобильные дороги общегосударственного значения (в том числе для международного сообщения)

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4
I-б	свыше 14 000	свыше 7000	Автомобильные дороги общегосударственного (не отнесенные к I-а категории), республиканского, областного (краевого) значения
II	от 6000 до 14 000	от 3000 до 7000	
III	от 2000 до 6000	от 1000 до 3000	Автомобильные дороги общегосударственного, республиканского, областного (краевого) значения (не отнесенные к I-б и II категориям), дороги местного значения
IV	от 200 до 2000	от 100 до 1000	Автомобильные дороги общегосударственного, республиканского, областного (краевого) и местного значения (не отнесенные к I-б, II и III категориям)
V	до 200	до 100	Автомобильные дороги местного значения (кроме отнесенных к III и IV категориям)

Основные технические параметры улиц и дорог представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Основные параметры поперечного профиля автомобильных дорог

Элементы дорог	Категории дорог					
	I-а	I-б	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6	7
Расчетная скорость, км/ч	150	120	120	100	80	60
Число полос движения	4; 6; 8	4; 6; 8	2	2	2	1
Ширина полосы движения, м	3,75	3,75	3,75	3,75	3	–
Ширина проезжей части, м	2×7,5; 2×11,25; 2×15	2×7,5; 2×11,25; 2×15	7,5	7	6	4,5
Ширина обочин, м	3,75	3,75	3,75	2,5	2	1,75
Наименьшая ширина укрепленной полосы обочины, м	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5	–

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7
Наименьшая ширина разделительной полосы между разными направлениями движения, м	6	5	–	–	–	–
Наименьшая ширина укрепленной полосы на разделительной полосе, м	1	1	–	–	–	–
Ширина земляного полотна, м	28,5; 36; 43,5	27,5; 35; 42,5	15	12	10	8

Размер и состав элементов поперечного профиля улиц и дорог определяется с учетом категорий улиц, характера и расчетной интенсивности движения всех видов городского транспорта и пешеходов, распределения проезжих частей, типа застройки, рельефа местности, способа отвода поверхностных вод, размещения подземных инженерных сетей, зеленых насаждений, протекающих рек.

В зависимости от назначения и транспортно-эксплуатационных характеристик городского движения городские улицы и дороги классифицируют по нескольким категориям (табл. 2.3, 2.4).

Таблица 2.3

Назначение городских улиц и дорог

Категория улиц и дорог	Основное назначение
1	2
Скоростные дороги	Скоростная транспортная связь удаленных районов города между собой, с крупными промышленными районами и с автомобильными дорогами общей сети. Развязка движения в разных уровнях с обеспечением непрерывности движения транспорта
Магистральные улицы: а) общегородского значения; б) районного значения; в) дороги грузового движения	Транспортная связь между жилыми, промышленными, складскими районами и внутри них, а также связь с центром населенного пункта, магистральными улицами и объектами общегородского значения, скоростными магистралями и дорогами, автомобильными дорогами общей сети. Развязка движения в одном или разных уровнях

1	2
Улицы и дороги местного значения: а) жилые улицы; б) дороги промышленных и коммунально-складских районов; в) пешеходные улицы и дороги; г) поселковые улицы; д) поселковые дороги	Транспортная и пешеходная связь микрорайонов, отдельных групп зданий и промышленных предприятий с магистральными улицами
Проезды	Транспортная и пешеходная связь внутри микрорайонов между улицами местного движения; подъезды к отдельным объектам промышленных районов

Таблица 2.4

Основные параметры городских улиц и дорог

Категория улиц и дорог	Расчетная скорость движения, км/ч	Ширина полосы движения, м	Число полос движения	Наименьший радиус кривых в плане, м	Наибольший продольный уклон, %	Ширина пешеходной части тротуара, м
1	2	3	4	5	6	7
Магистральные дороги: скоростного движения;	120	3,75	4–8	600	30	–
регулируемого движения	80	3,50	2–6	400	50	–
Магистральные улицы: – общегородского значения: а) непрерывного движения;	100	3,75	4–8	500	40	4,5
б) регулируемого движения;	80	3,50	4–8	400	50	3,0
– районного значения: а) транспортно-пешеходные;	70	3,50	2–4	250	60	2,25
б) пешеходно-транспортные	50	4,00	2	125	40	3,0

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7
Улицы и дороги местного значения:						
а) в жилой застройке;	40	3,00	2–3	90	70	1,5
б) научно-производственных районов;	30	3,00	2	50	80	1,5
в) промышленных районов;	50	3,50	2–4	90	60	1,5
г) коммунально-складских районов;	40	3,50	2	50	70	1,5
д) парковые дороги	40	3,00	2	75	80	–
Проезды:						
а) основные;	40	2,75	2	50	70	1,00
б) второстепенные	30	3,50	1	25	80	0,75
Пешеходные улицы:			По рас- чету			По проекту
а) основные;	–	1,00		–	40	
б) второстепенные	–	0,75		–	60	
Велосипедные дорожки:						
а) обособленные;	20	1,50	1–2	0	40	–
б) изолированные	30	1,50	2–4	50	30	–

Скоростные дороги – это скоростная транспортная связь между районами крупнейшего или крупного города и между городами и другими населенными пунктами системы группового расселения с развязкой движения транспорта в разных уровнях. Расчетная скорость движения на таких дорогах может достигать 120 км/ч.

Магистральные улицы и дороги обеспечивают транспортную связь между жилыми, промышленными районами и общественными центрами, а также их связь со скоростными дорогами в пределах города с развязкой движения в разных уровнях. Расчетная скорость движения транспортных средств составляет 80–100 км/ч (в зависимости от подтипа дороги), рис. 2.1, а, б.

Улицы и дороги местного назначения применяются для организации локального дорожного движения. По месту использования этих дорог происходит деление их на подгруппы. Максимальная скорость на таких дорогах варьируется в пределах от 20 до 60 км/ч, рис. 2.1, в.

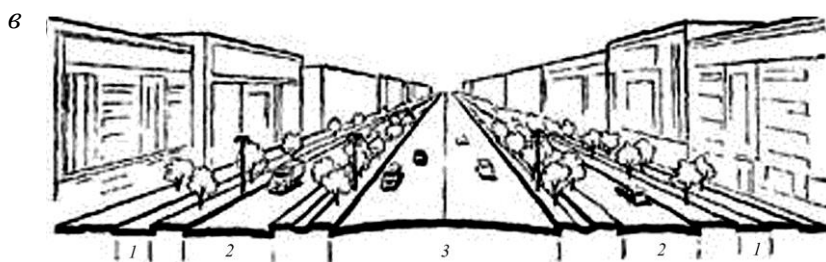
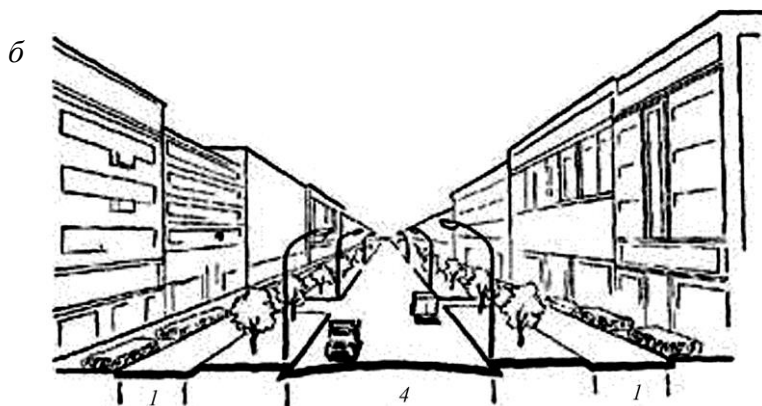
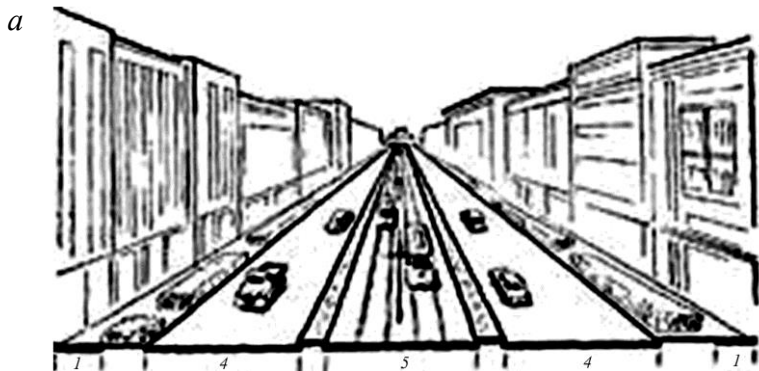


Рис. 2.1. Поперечные профили городских улиц:
а – магистральная улица; *б* – магистральная улица общегородского назначения;
в – улица жилого квартала; 1 – тротуар; 2 – местное движение; 3 – транзитное движение; 4 – проезжая часть, 5 – обособленное трамвайное полотно

Основные элементы городских дорог приведены на рис. 2.2–2.5.

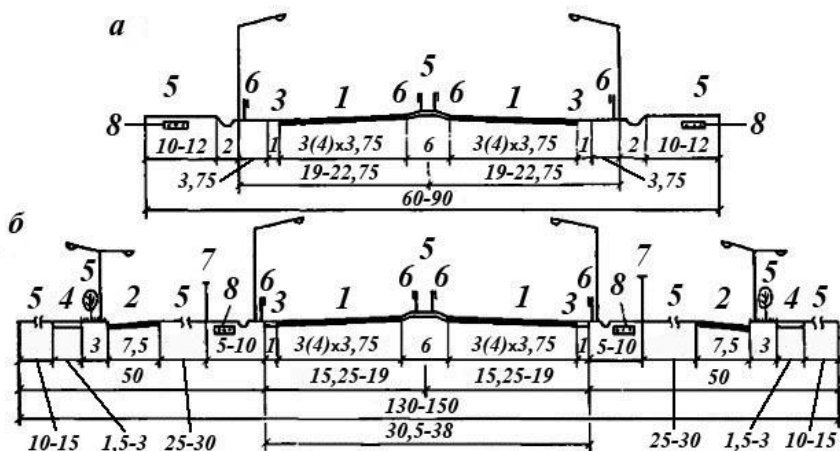


Рис. 2.2. Типовые поперечные профили скоростных дорог:

а – вне застройки; *б* – в промышленно-складских районах;

1 – основная проезжая часть; *2* – местные и боковые проезды; *3* – предохранительные и краевые полосы; *4* – тротуары; *5* – разделительные полосы и полосы озеленения; *6* – предохранительный брус; *7* – ограждения пешеходов; *8* – кабели освещения и связи

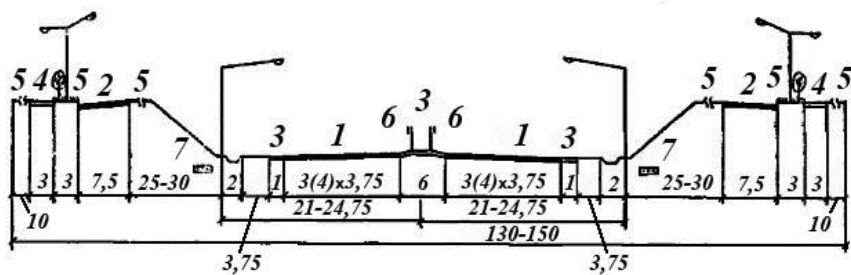


Рис. 2.3. Типовой поперечный профиль скоростной дороги в выемке:

1 – основная проезжая часть; *2* – местные и боковые проезды; *3* – предохранительные и краевые полосы; *4* – тротуары; *5* – разделительные полосы и полосы озеленения; *6* – предохранительный брус; *7* – кабели освещения и связи

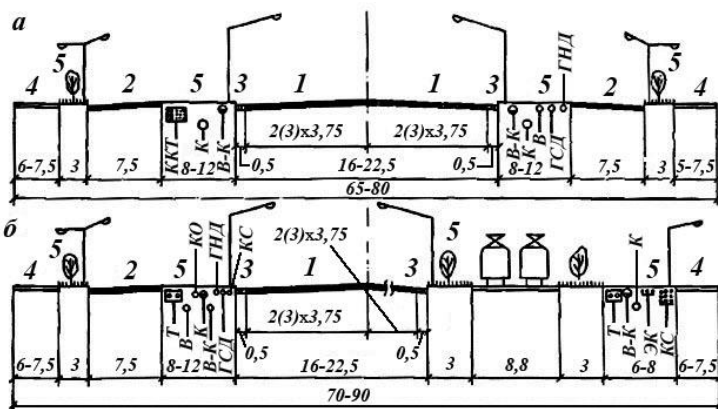


Рис. 2.4. Типовые поперечные профили общегородской магистрали регулируемого движения:

а – без трамвая; *б* – с трамваем; *1* – основная проезжая часть; *2* – боковые и местные проезды; *3* – предохранительные полосы; *4* – тротуары; *5* – разделительные полосы и полосы озеленения; *Т* – телефонные кабели; *В* – водопровод; *В-К* – водопровод и канализация; *К* – канализация; *ЭК* – электрокабели; *КС* – кабели связи; *КО* – кабели освещения; *ГНД* – газопровод низкого давления; *ГСД* – газопровод среднего давления; *ККТ* – коллектор электрических и телефонных кабелей

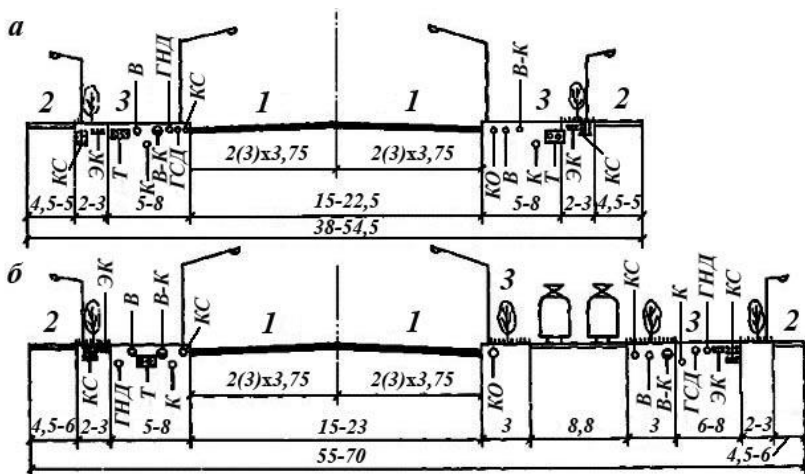


Рис. 2.5. Типовые поперечные профили магистралей районного значения:

а – без трамвая; *б* – с трамваем; *1* – основная проезжая часть; *2* – тротуары; *3* – полосы озеленения; *Т* – телефонные кабели; *КС* – кабели связи; *ЭК* – электрокабели; *В* – водопровод; *К* – канализация; *В-К* – водопровод и канализация; *КО* – кабели освещения; *ГНД* – газопровод низкого давления; *ГСД* – газопровод среднего давления

Ширину магистральных улиц общегородского значения в пределах городской черты принимают не менее 45 м, районного значения – не менее 35 м, улиц местного движения при многоэтажной застройке – не менее 25 м, при малоэтажной – не менее 15 м.

Вопросы, связанные с благоустройством улиц, решаются комплексно с учетом устройства и переустройства как наземных, так и подземных сооружений. Городская дорога – дорогостоящее сооружение, поэтому проектированию сети дорог предшествуют расчеты ожидаемых на них транспортных потоков. Распределение транспортных потоков на дорогах по сетевым критериям и расчеты элементов улиц (ширины, продольных и поперечных уклонов, радиусов кривых и т. д.) ведутся в полном соответствии с выбранной категорией дороги и интенсивностью ожидаемого движения.

Основной элемент городской улицы – дорожное покрытие, которое воспринимает и передает на грунт вертикальные, продольные и боковые нагрузки от ходовых колес подвижного состава (автомобилей, троллейбусов). Оно должно отвечать необходимым требованиям прочности, ровности, шероховатости, сопротивления износу и санитарно-гигиеническим требованиям. Для удовлетворения этих требований дорожные покрытия делают многослойными. Верхний слой покрытия воспринимает нагрузки от ходовых колес подвижного состава и передает их на основание, которое, в свою очередь, распределяет эти нагрузки по нижнему (подстилающему) слою.

Покрытие часто имеет защитный слой (слой износа). Наибольшие нагрузки воспринимает верхний слой покрытия, наименьшие – подстилающий. Поэтому верхние слои дорожных одежд делают из более прочных материалов. Основным материал покрытий – асфальтобетон или цементобетон, а также булыжник, брусчатка, мозаика, щебенка, гравий и т. д. Сборные и монолитные цементобетонные и железобетонные покрытия, брусчатые мостовые на щебеночном и гравийном основаниях, обработанных вяжущими материалами, а также мозаичные мостовые на бетонных и каменных основаниях называют *усовершенствованными капитальными покрытиями*. Обработанные вяжущими материалами щебеночные и гравийные покрытия, покрытия из битумно-минеральных смесей или холодного асфальтобетона на щебеночном и шлаковом основаниях или грунтах называют *усовершенствованными облегченными покрытиями*. Покрытия из грунтоасфальта, а также щебеночные, гравийные, шла-

ковые, грунтощебеночные и грунтогравийные покрытия, обработанные вяжущими материалами, мостовые из булыжного и колотого камня – *переходными покрытиями*. Грунтовые, улучшенные местными минеральными материалами, а также гравийные, щебеночные и шлаковые покрытия, необработанные вяжущими материалами, – *простейшими покрытиями*. Каждый вид покрытий по-своему влияет на характеристики дороги и применяется в зависимости от назначения дороги и параметров местности.

2.2. Неровности дорог

Первичной абстракцией дорожных неровностей является *поверхность дороги*. Эта абстракция приемлема для достаточно твердой малодеформируемой дороги, конкретный участок которой считается реализацией случайных неровностей. Совокупность таких реализаций представляет собой *рельеф дороги*, служащий исходным понятием для определения характеристик или моделей дорожных неровностей. Рельеф является также наиболее общей моделью дорожных неровностей.

Профиль дороги – сечение рельефа в направлении движения транспорта. Сечение поверхности конкретного участка дороги является реализацией профиля, а совокупность таких реализаций представляет собой профиль дороги как случайный процесс.

Рельеф и профиль дороги часто принимают как функции расстояния (пути). Рельеф дороги, выраженный в функции не расстояния, а времени, называют *возмущением*. Термин «возмущение» относится к конкретной расчетной схеме подвижного состава.

Профиль дороги делится на три составляющие – макропрофиль, микропрофиль и шероховатости, что обусловлено различным воздействием их на подвижной состав. *Макропрофиль*, состоящий лишь из длинных плавных неровностей длиной волны 100 м и более, практически не вызывает колебаний подвижного состава на подвеске, но заметно влияет на его динамику, режим работы тягового электродвигателя и трансмиссии. *Микропрофиль* состоит из неровностей, длина волны которых изменяется от 10 см до 100 м, вызывает колебания подвижного состава на подвеске, но не содержит длительных спусков или подъемов, изменяющих режим работы тягового электродвигателя. *Шероховатости* (длина волны менее 10 см)

сглаживаются шинами троллейбуса и влияют на их работу (сцепление с дорогой, износ и т. п.).

Использование в качестве возмущения микропрофиля вместо профиля дороги имеет следующие преимущества:

– микропрофиль не содержит медленно меняющейся составляющей, и его можно считать стационарным случайным процессом с быстро убывающим показателем регулярности;

– у микропрофиля ограничена амплитуда. Ее максимальные значения не превышают 1 м, а у профиля дороги разница высот может достигать нескольких километров;

– вследствие отсутствия шероховатостей существенно уменьшается поток информации. Так, при применении ЭВМ допускается квантование микропрофиля по длине с шагом 10 см.

Периодические гармонические неровности. В простейшем случае дорожные неровности представляют в виде косинусоидальных выступов (рис. 2.6). Профиль таких неровностей описывается выражением

$$q = q_0 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{l_n} \right) \right],$$

где q_0 – амплитуда высоты неровности;

x – абсцисса неровности;

l_n – длина неровности.

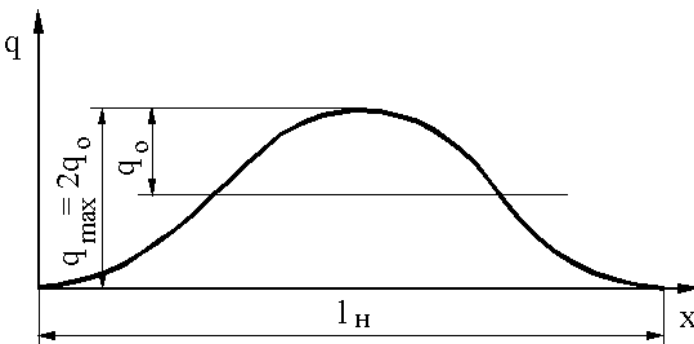


Рис. 2.6. Профиль косинусоидальной неровности

При равномерном движении подвижного состава ($v = \text{const}$) путь рассчитывается по формуле $x = vt$, а возмущение, передаваемое от неровностей на его ходовую систему, изменяется по закону

$$q = q_0 [1 - \cos(vt)],$$

где v – частота возмущения, $v = 2\pi\nu / l_n$.

Случайные неровности. В реальных условиях неровности дороги имеют беспорядочный характер: различный профиль, длину неровности, т. е. изменение их ординат можно рассматривать как случайный процесс. В большинстве случаев автокорреляционная функция обычно хорошо аппроксимируется зависимостью вида

$$\rho(l) = a_1 e^{-\alpha_1 |l|} + a_2 e^{-\alpha_2 |l|} \cos \beta \cdot l,$$

а при известной скорости движения транспорта v , т. е. при $l = vt$,

$$\rho(t) = a_1 e^{-\alpha_1 t} + a_2 e^{-\alpha_2 t} \cos \beta \cdot t.$$

В этом случае соответствующая функция спектра может быть записана так:

$$S_q(\omega) = 2D_q \left[\frac{a_1 \alpha_1 v}{\omega^2 + (\alpha_1 v)^2} + \frac{a_2}{2} \left(\frac{\alpha_2 v}{(\omega + \beta)^2 + (\alpha_2 v)^2} + \frac{\alpha_2 v}{(\omega - \beta)^2 + (\alpha_2 v)^2} \right) \right].$$

Периодическая составляющая вовсе не является обязательной особенностью микропрофиля, поэтому в большинстве случаев представляется возможным принять $a_1 = 1$ и $a_2 = 0$, что позволяет значительно упростить расчеты. Показатель экспоненты α_1 изменяется в пределах 0,08–0,40. Наиболее существенной характеристикой микропрофиля дороги является величина дисперсии D_q .

Часто кривая спектральной плотности микропрофиля дороги аппроксимируется дробно-рациональной функцией вида

$$S_q(\lambda) = \frac{K_0(\lambda^2 + \lambda_1^2) \cdot \dots \cdot (\lambda^2 + \lambda_{2n-1}^2)}{(\lambda^2 + \lambda_0^2) \cdot (\lambda^2 + \lambda_2^2) \cdot \dots \cdot (\lambda^2 + \lambda_{2n}^2)},$$

где k_0, λ_i – константы.

Функция $S_q(\lambda)$ полностью определяет статистические характеристики автомобильных дорог. Интеграл в пределах от λ_a до λ_b равен дисперсии высот неровностей в диапазоне длин $l_a \dots l_b$, где $l_a = 1 / \lambda_a$; $l_b = 1 / \lambda_b$:

$$D_{ab} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} S_q(\lambda) d\lambda.$$

Среднеквадратическое отклонение σ_{ab} высот неровностей микропрофиля дороги в этом диапазоне:

$$\sigma_{ab} = \sqrt{D_{ab}},$$

максимально возможный перепад высот составит

$$h_{\max} = 2q_{\max} = 2 \cdot 3\sigma_{ab} = 6\sigma_{ab}.$$

В табл. 2.5 приведены характеристики неровностей $\rho = A_1 e^{-\alpha_1 |l|} \cos \beta_1 l + A_2 e^{-\alpha_2 |l|} \cos \beta_2 l$ при $v = 1$ м/с микропрофиля дорог с усовершенствованным покрытием, полученные различными исследователями.

Таблица 2.5

Характеристики неровностей

Дорога	$\sqrt{R(0)}$, см	A_1	A_2	$\alpha_1, 1/c$	$\alpha_2, 1/c$	$\beta_1, 1/c$
Асфальтовая (по А. А. Тихонову)	0,80–1,25	0,85	0,15	0,20	0,05	0,60
Цементобетонная (по А. А. Тихонову)	0,50–1,24	1,0	–	0,15	–	–
Асфальтовая (по Н. М. Антышеву)	0,815	–	1,0	–	0,13	1,05

В табл. 2.6 приведены статистические свойства дорог с усовершенствованным покрытием.

Таблица 2.6

Статистические свойства автомобильных дорог
(по И. Г. Пархиловскому, Я. М. Певзнеру, В. Л. Афанасьеву)

Дорога	Среднеквадратическая высота неровности, см	Аппроксимирующие выражение нормированной корреляционной функции
Асфальтовая, хорошего качества	0,80–1,26	$\rho(l) = 0,85e^{-0,2 l } + 0,15e^{-0,15 l } \cos 0,6l$
Цементобетонная	0,50–1,24	$\rho(l) = e^{-0,15 l }$

Среднеквадратическое отклонение при гармонических колебаниях и нулевом смещении:

$$\sqrt{R(0)} = \frac{q_0}{\sqrt{2}} \approx 0,71q_0.$$

К малоизношенным дорожным покрытиям относятся покрытия при $\sqrt{R(0)} \leq 1,5$ см, к сильно изношенным – при $\sqrt{R(0)} = 1,5–3,0$ см, к разбитым – при $\sqrt{R(0)} > 3,0$ см.

Единичные неровности. Кроме естественных неровностей, изменяющихся по гармоническому или случайному закону, на городских дорогах для обеспечения безопасности устанавливают искусственные неровности. *Искусственная неровность* – местное искусственное возвышение над поверхностью покрытия проезжей части, устанавливаемое с целью принудительного снижения скорости движения транспорта на определенных участках дорог или предупреждения о приближении к опасному участку путем шумового воздействия на водителя («шумовые полосы») [3]. Искусственная неровность в продольном сечении имеет или криволинейную (рис. 2.7, а), или трапецидальную форму (рис. 2.7, б).

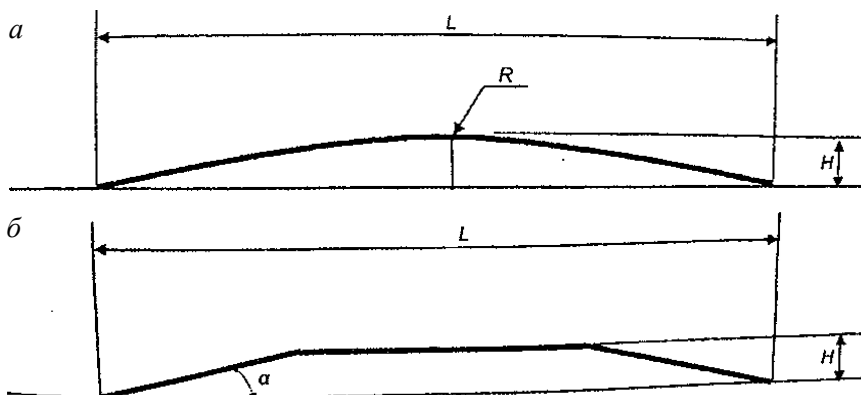


Рис. 2.7. Формы искусственных неровностей:
a – криволинейная форма; *б* – трапециевидная форма

Размеры искусственных неровностей представлены в табл. 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7

Размеры элементов искусственных неровностей
 криволинейной формы

Максимально допустимая скорость движения, км/ч	Размеры элементов искусственных неровностей		
	Длина хорды L , м	Высота H , м	Радиус криволинейной поверхности R , м
20	1,0	0,065	1,93
30	1,5	0,065	4,33
40	2,0	0,065	7,69

Таблица 2.8

Размеры элементов искусственных неровностей
 трапециевидной формы

Максимально допустимая скорость движения, км/ч	Размеры элементов искусственных неровностей	
	Длина основания L , м	Высота H , м
20	1,00	0,065
20	3,50	0,065
30	1,5	0,065
30	3,50	0,065
40	2,0	0,060
40	3,50	0,065

Для минимальной деформации шин при наезде на искусственную неровность угол наезда должен составлять от 15° до 45° .

Получим выражение для описания криволинейной формы неровности. Представим расчетную схему неровности криволинейной формы в следующем виде (рис. 2.8).

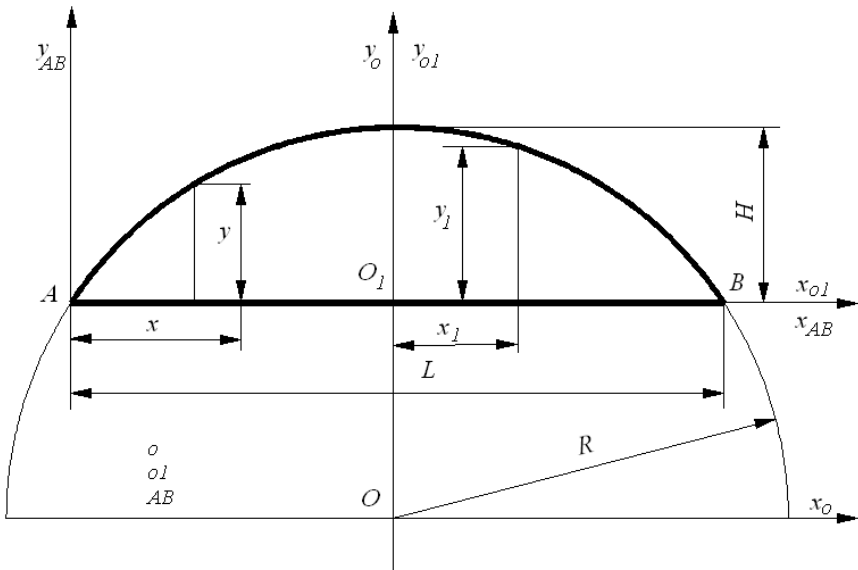


Рис. 2.8. Расчетная схема криволинейной формы неровности: H – наибольшая высота неровности; L – длина неровности; R – радиус неровности; y_1 – высота неровности в зависимости от расстояния x_1 от точки O_1

Точки на дуге окружности в системе координат $x_{o1}O_1y_{o1}$ описываются уравнением $x_{o1}^2 + y_{o1}^2 = 1$. Тогда текущее значение высоты неровности можно рассчитать по выражению

$$y_1 = \sqrt{R^2 - x_1^2} - R + \frac{L}{8R}.$$

Удобнее пользоваться этим выражением, если перенести начало координат в точку A (начало круговой формы неровности). В этом случае

$$y = \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2} - x\right)^2} - R + \frac{L}{8R}. \quad (2.1)$$

В последнем выражении координата x изменяется от нуля до длины неровности L .

Пример 2.1. Построить график изменения высоты круговой формы неровности при $L = 1$ м, $H = 65$ мм, $R = 1,93$ м.

Решение

Для решения данной задачи можно использовался пакет MathCAD. Подставив в выражение (2.1) заданные исходные данные и изменяя координату x от нуля до 1 м, получаем график, представленный на рис. 2.9.

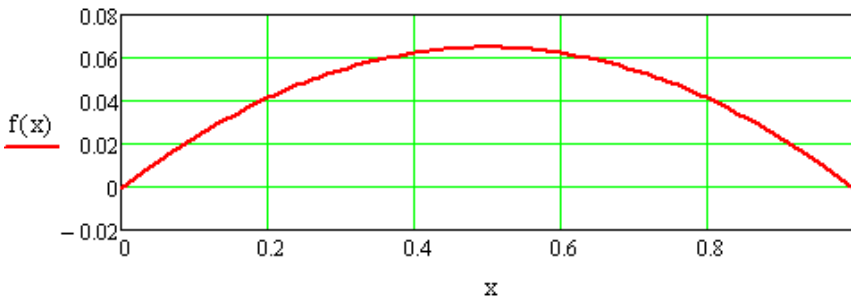


Рис. 2.9. График круговой формы неровности при $L = 1$ м, $R = 1,93$ м, $H = 65$ мм

При изменении координаты x от нуля до L трапециевидная форма неровности (рис. 2.7, б) описывается выражением

$$y = \begin{cases} kx & \text{при } 0 \leq x \leq H/k; \\ H & \text{при } H/k < x \leq L - H/k; \\ \left[1 - (x - L + H/k)/(H/k)\right]H & \text{при } L - H/k < x \leq L, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $k = \operatorname{tg}\alpha$.

Пример 2.2. Построить график изменения высоты трапецевидной формы неровности при $L = 1$ м, $H = 65$ мм, $\alpha = 30^\circ$.

Р е ш е н и е

Для решения данной задачи использовался пакет Delphi, в котором запрограммированы выражения (2.2) и использованы заданные исходные данные. При этом координата x изменялась от нуля до 1 м. В результате получаем график, представленный на рис. 2.10.

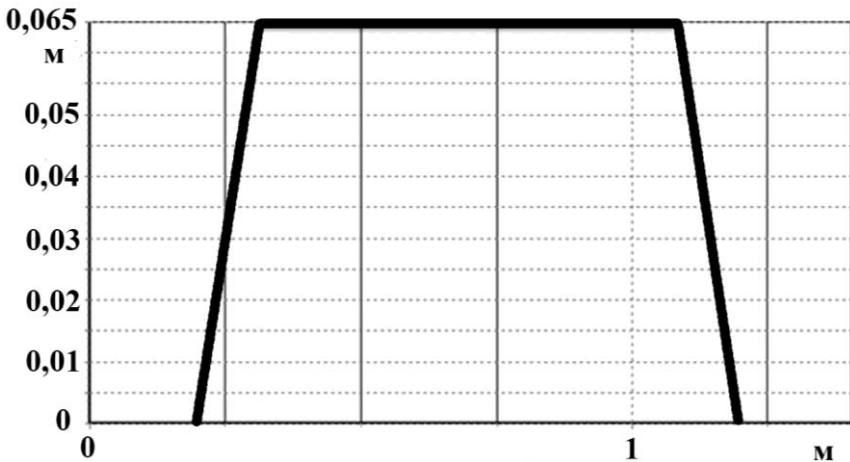


Рис. 2.10. График трапецевидной формы неровности при $L = 1$ м, $H = 65$ мм, $\alpha = 30^\circ$

Во время ямочного ремонта проезжей части дороги встречаются неровности, вид которых представлен на рис. 2.11, а.

Такая неровность описывается выражением

$$y = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq x \leq x_0; \\ -H & \text{при } x_0 < x \leq (x_0 + L); \\ 0 & \text{при } (x_0 + L) < x \leq x_{\max}. \end{cases}$$

При движении сочлененного троллейбуса по криволинейной траектории малого радиуса довольно часто колеса полуприцепа наезжают на типовую единичную неровность (рис. 2.11, б). Она описывается следующим алгебраическим уравнением:

$$y = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq x \leq x_0; \\ H & \text{при } x_0 < x \leq (x_0 + L_1); \\ 0 & \text{при } (x_0 + L_1) < x \leq x_{\max}. \end{cases}$$

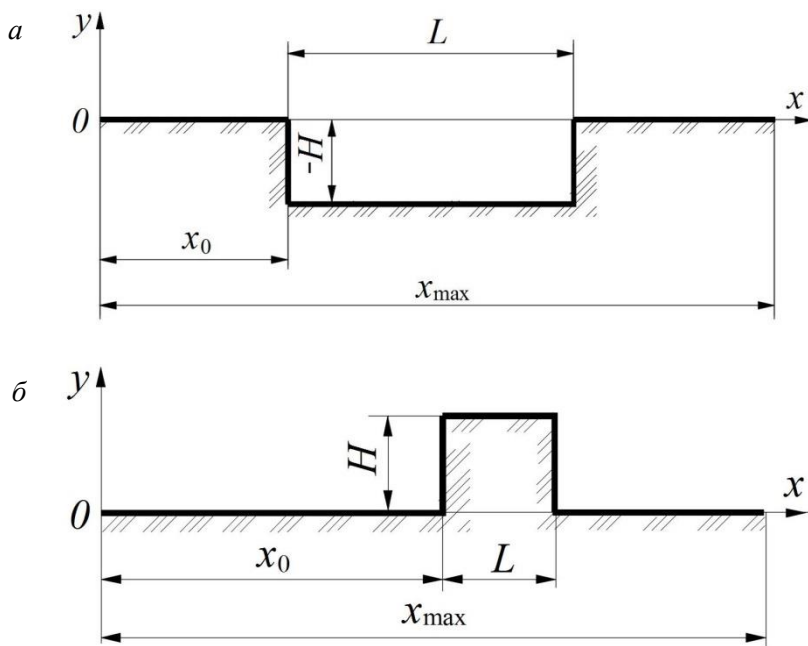


Рис. 2.11. Единичные неровности:

а – яма; *б* – бордюрный камень; *x* – текущая координата; *H* – глубина;
L – длина; *x*₀ – начало неровности; *x*_{max} – координаты *x*

В настоящее время городские дороги меняются в свете новых требований к единичным искусственным препятствиям, которые чаще называют «спящими полицейскими». В зависимости от скоростного режима их ширина составляет от 1,0 до 3,5 м, высота – до 6,5 см.

Однако на экологическую обстановку города «спящие полицейские» влияют не лучшим образом. Перед ними автомобили вынуждены тормозить, а потом набирать скорость, чем создают дополнительный шум. Выхлоп при этом получается гораздо больший, вредные газы поступают в жилые дома и квартиры, нанося вред здоровью жителей города, считают медики из БелМАПО.

2.3. Рельсовый путь и его элементы

2.3.1. Основные понятия и определения

Рельсовый трамвайный путь предназначен для восприятия нагрузок от колес трамвая и передачи его на грунт, а также для направления движения колес вагона по рельсовой колее.

По отношению к проезжей части улицы трамвайные пути располагаются на одном уровне с ней, на обособленном или на собственном полотне (рис. 2.12).

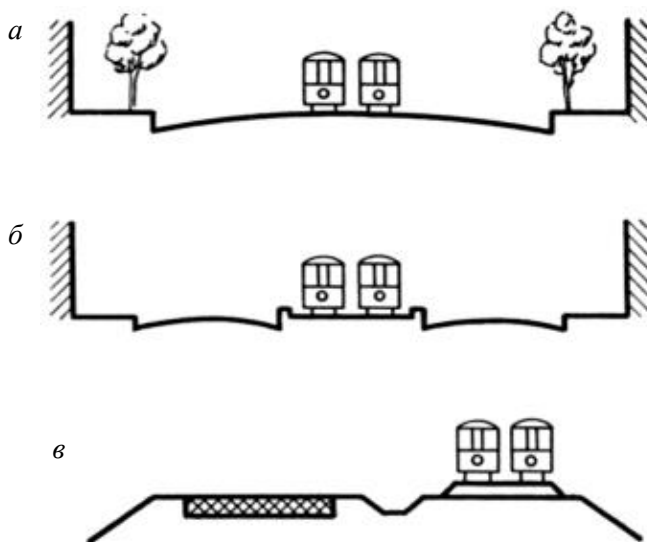


Рис. 2.12. Типы трамвайного полотна

В первом случае (рис. 2.12, *a*) трамвайное полотно составляет как бы единое целое с проезжей частью дороги. Это дает возмож-

ность автотранспорту использовать трамвайное полотно при обгонах, объезде препятствий и пр.

При устройстве обособленного трамвайного полотна его изолируют от проезжей части бортовым камнем, что исключает его использование другими видами транспорта. Применение обособленного трамвайного полотна практически возможно на улицах шириной не менее 35 м (рис. 2.12, б). Там, где ширина улицы допускает устройство обособленного полотна, реконструируют трамвайные пути и переводят их с полотна в общем уровне с проезжей частью на обособленные пути. На новых магистральных улицах трамвайные линии проектируются только на обособленном полотне.

Преимущества обособленного движения трамвая заключаются в следующем:

- хорошая организация движения на магистральной улице в результате четкого разделения направлений;

- принудительная фиксация пешеходных переходов вследствие окаймления трамвайного полотна плотными посадками кустарника;

- более высокий уровень безопасности движения в силу вышеизложенного;

- более высокая скорость движения трамвайного транспорта вследствие полной изоляции трамвайного полотна от других видов транспорта и пешеходов;

- более высокая скорость автомобильного транспорта ввиду отсутствия помех со стороны пассажиров на проезжей части и на остановочных пунктах трамвая;

- меньший расход электроэнергии трамвайным транспортом в результате более плавного движения, меньшего количества замедлений и ускорений, лучшего использования выбега;

- меньшие капиталовложения при устройстве трамвайных путей за счет применения более дешевых железнодорожных рельсов, а также отсутствия необходимости укладки дорожного покрытия в трамвайном полотне;

- большая простота и дешевизна выполнения путевых ремонтных работ ввиду отсутствия необходимости разборки и последующего восстановления дорожной одежды.

Вылетные трамвайные линии за пределами застроенной части города располагаются, как правило, на собственном полотне

(рис. 2.12, в), реже – на обочинах автомобильной дороги или по оси проезжей части.

Трамвайные пути бывают двухпутными и однопутными. Наиболее распространены двухпутные трамвайные линии, обеспечивающие большую провозную способность и большие скорости движения поездов.

Трамвайные пути на двухпутных участках расположены друг от друга на определенном расстоянии, которое обуславливается шириной вагона, расстоянием между кузовами двух вагонов и наличием или отсутствием опор контактной сети в междупутье. Ширина междупутья измеряется между осями двух смежных путей (рис. 2.13).

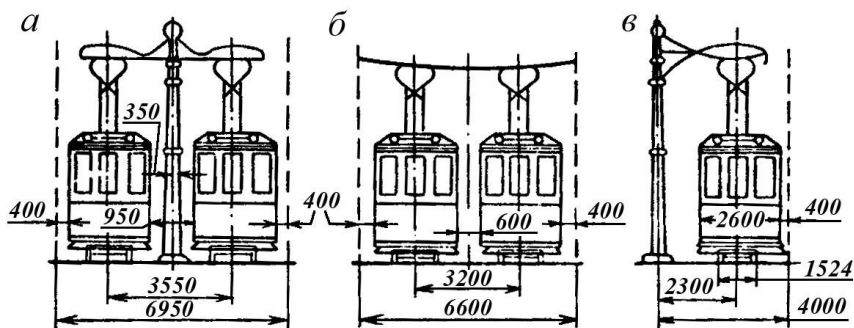


Рис. 2.13. Габариты трамвайных путей:

а – двухколейный с опорами для контактной сети в междупутье;

б – двухколейный с поперечным подвесом контактного провода;

в – одноколейный

При установке в междупутье центральных опор контактной сети расстояние между осями путей на прямых участках равно 3550 мм, что обеспечивает зазор между вагонами 950 мм (рис. 2.13, *а*).

Наименьшее расстояние между кузовами двух вагонов на путях с поперечным подвесом контактного провода принимают равным 600 мм (рис. 2.13, *б*). В этом случае минимальная величина междупутья на прямых участках пути равна 3200 мм (ширина кузова вагона 2600 мм плюс зазор между вагонами 600 мм).

На кривых участках пути передний угол кузова вагона выносится несколько наружу, а его середина смещается внутрь кривой. Поэтому на кривых участках междупутье увеличивается в зависи-

мости от величины радиуса кривой. Чем меньше радиус кривой, тем больше величина выноса угла кузова и смещение середины вагона.

Кривые трамвайных путей описываются по дугам окружности различных радиусов. В зависимости от величины радиуса кривые трамвайных путей подразделяют на три группы:

- *кривые малых радиусов* при величине радиуса 20–75 м;
- *кривые средних радиусов* при величине радиуса 76–200 м;
- *кривые больших радиусов* при величине радиуса более 200 м.

Продольный профиль трамвайного пути зависит от продольного профиля улиц и представляет собой сочетание подъемов, спусков и горизонтальных участков. Крутизна подъемов и спусков (уклоны) определяется отношением разности высотных отметок между двумя точками пути к длине между ними, измеренной по горизонтали. Уклоны измеряют в тысячных или сотых долях. Чем больше величина уклона, тем бóльшую силу тяги должен развивать трамвай на подъеме или тормозную силу на спуске. Изменение продольного профиля трамвайного пути по отношению к профилю улицы возможно только в незначительных пределах и при обособленном трамвайном полотне.

Предельные уклоны трамвайных путей определяют исходя из силы тяги трамвая по сцеплению колес с рельсами. Предельные максимальные углы для трамвайных путей имеют следующие значения:

- для одновагонных поездов – 90 ‰, или 0,09;
- для двухвагонных составов – 80 ‰, или 0,08;
- для трехсекционных сочлененных трамваев – 60 ‰, или 0,06.

Перелом двух смежных уклонов с алгебраической разностью более 70 ‰ смягчается вписыванием вертикальной кривой радиусом 500–2000 м.

Трамвайный путь состоит из следующих основных конструктивных элементов:

– *верхнего строения*, к которому относятся рельсы, специальные части (стрелки, крестовины, пересечения) со скреплениями (подкладки, накладки, костыли, шурупы, болты, тяги и др.) и электросоединения;

– *нижнего строения* (основание), состоящего из подрельсовых опор в виде шпал, продольных лежней или рамных конструкций и балласта из различного материала (песка, щебня, гравия и др.); при отсутствии подрельсовых опор основанием пути может служить бетон или непосредственно балласт, как правило, щебеночный;

– *земляного полотна*, которое может быть выполнено в виде продольного котлована в тех случаях, когда пути расположены в пределах проезжей части улиц, и в виде насыпей и выемок при размещении трамвайных путей на обособленном полотне;

– *водоотводных сооружений* – путевых и стрелочных водоприемных коробок с кольцами, дренажа, лотков, кюветов, труб и др.;

– *дорожного покрытия* различных типов – булыжное, брусчатое, железобетонное, асфальтовое и др.

Верхнее строение пути непосредственно воспринимает динамическое воздействие колес трамвая на рельсы и передает это воздействие нижнему строению и земляному полотну.

Основным конструктивным размером рельсового пути, определяющим его взаимодействие с колесами трамвая, является *ширина колеи* рельсового пути – расстояние между рабочими гранями головок двух рельсов, измеряемое перпендикулярно продольной оси пути.

Нормальная ширина колеи трамвайных путей на прямых участках равна 1524 мм (железнодорожная колея равна 1520 мм). На кривых участках пути ширина колеи увеличивается на определенную величину в зависимости от радиуса кривой для того, чтобы улучшить проход ходовых частей трамвайного вагона.

Под воздействием колес проходящих трамваев в верхнем строении пути накапливаются *остаточные деформации*. Интенсивность их накопления различна на различных участках пути. Поэтому постепенно головки рельсов отклоняются от первоначального (нормального) положения и возникают различного рода неровности пути, двигаясь по которым колеса совершают вертикальные колебательные движения. В результате чего и реакция упругих элементов на кузов трамвая становится переменной, что, в свою очередь, вызывает колебания кузова.

2.3.2. Динамические характеристики верхнего строения пути

Важнейшей динамической характеристикой верхнего строения пути является его *жесткость*. Жесткость пути в вертикальном и горизонтальном направлениях неодинакова. Неодинакова она в стыке и середине рельса.

Вертикальная жесткость пути определяется отношением действующей на головку рельса вертикальной нагрузки к вертикальному перемещению точки контакта колеса с рельсом. Это перемещение вызвано прогибом рельса, сжатием упругих прокладок в промежуточных креплениях (скреплениях), сжатием и изгибом шпал, сжатием балластного слоя и верхней части земляного полотна. Для пути с рельсами типа Р65 при расчетах динамического воздействия на путь различных вагонов ее можно принимать по табл. 2.9.

Таблица 2.9

Вертикальная жесткость пути с рельсами Р65

Подрельсовое основание	Вертикальная жесткость пути, МН/м (т/мм)			
	летом		зимой	
	при состоянии пути			
	хорошем	удовлетворительном	хорошем	удовлетворительном
Шпалы деревянные Балласт щебеночный	40–50 (4–5)	30–40 (3–4)	100–120 (10–12)	80–100 (8–10)
Шпалы железобетонные Балласт щебеночный	80–120 (8–12)	60–80 (6–8)	150–180 (15–18)	100–150 (10–15)
Сплошное из железобетонных блоков	100–150 (10–15)	80–120 (8–12)	150–200 (15–20)	140–160 (14–16)

Дополнительное сопротивление деформированию верхнего строения пути создается силами трения, возникающими в его конструкции. Силы трения условно разбивают на две составляющие: пропорциональная вертикальному перемещению рельса под нагрузкой (аналог сухого трения), пропорциональная скорости изменения вертикального перемещения рельса (аналог вязкого трения).

При выполнении приближенных расчетов принимают, что реакция пути за счет сухого трения составляет при статическом действии нагрузки (для пути на шпалах) 25 % величины упругой реакции пути.

Колеса соударяются с рельсом во время прохождения стыков, при наличии на колесе «лыски» (ползуна) и при движении колеса по рельсу с короткими неровностями, образовавшимися в результате

волнообразного износа рельса. Продолжительность удара составляет тысячные доли секунды. За это время волны деформации верхнего строения пути не успевают распространиться на большое расстояние.

При приближенном расчете сил соударения колеса и рельса колеблющуюся массу пути заменяют условной массой, приведенной к точке удара, которую называют *приведенной массой пути*. Приведенная масса пути – это условная величина – коэффициент пропорциональности в расчетных уравнениях, связывающий скорость удара колеса по рельсу с максимальной величиной силы соударения. В расчетах приведенную массу и соответствующую ей длину отрезка рельса можно принимать по табл. 2.10. Для ориентировочной оценки приведенной массы при ударном взаимодействии колес и рельсов на стыках можно принять, что она в 1,5 раза меньше, чем в промежуточных сечениях рельса.

Таблица 2.10

Приведенная масса и длина рельса

Тип рельса	Масса, кг	Длина, м
P50	100	2,0
P65	150	2,5
P75	200	3,0

Горизонтальная жесткость пути определяется отношением горизонтальной поперечной (боковой) силы, приложенной к головке рельса, к вызванному этой силой отклонению головки рельса от положения в ненагруженном состоянии. Отклонение отжатия возникает за счет деформации упругих прокладок между рельсами и шпалами, деформации шпал и смещения подошвы рельса по шпале. Величина отжатия головки рельса существенно зависит от материала шпал, времени года (особенно при деревянных шпалах) и конструкции промежуточных скреплений. Жесткость рельсовых нитей в горизонтальном направлении для сравнительных расчетов может быть принята в соответствии с табл. 2.11. Горизонтальная жесткость рельсовых нитей в стыке, так же как и вертикальная, в 1,25–1,50 раз ниже, чем в промежуточных сечениях.

Таблица 2.11

Жесткость рельсовых нитей

Материал шпал	Промежуточное скрепление	Горизонтальная жесткость, МН/м	
		летом	зимой
Дерево	Нераздельное	10	15
	Раздельное	20	20
Железобетон	Раздельное	25	30

2.3.3. Рельсы

Рельсы являются основным элементом верхнего строения пути. Они должны обеспечивать плавное качение колес без ударов и по возможности распределять их динамическое давление на бóльшее число шпал.

По форме поперечного сечения рельсы подразделяются на две группы: железнодорожного типа с простой головкой и желобчатые, применяемые только для трамвайных путей, с головкой сложного очертания. Профиль рельса имеет головку, шейку, подошву и пазухи пространства. Головка желобчатого рельса сложная. В ней различают большое яблоко, губу, или малое яблоко, и пространство между ними, называемое желобом.

Основными размерами профиля рельса кроме полной высоты и ширины подошвы являются: ширина и высота головки, толщина шейки и подошвы, а для трамвайных рельсов – еще толщина губы и ширина желоба. Предельную длину рельсов выбирают с таким условием, чтобы при температурных изменениях не происходило разрушение пути (изгибов или разрывов). Железнодорожные рельсы имеют длину 12,5 м и 25 м.

Для трамвайного пути и метро применяются рельсы как железнодорожных типов Р50, Р65 и Р75 с массой одного погонного метра соответственно примерно 50, 65 и 75 кг (рис. 2.14, *а*), так и желобчатые (трамвайные) рельсы (рис. 2.14, *б*). В обозначении желобчатых рельсов буквы обозначают их назначение: Тв – трамвайный высокий для кривых участков пути; Тн – трамвайный низкий для прямых участков пути, – а цифры – массу одного погонного метра рельса. Чем больше погонная масса рельса, тем больше момент

инерции его поперечного сечения, больше жесткость на изгиб и равномернее распределяется динамическая нагрузка от колес трамвая. В результате уменьшается интенсивность накопления остаточных деформаций в балластном слое, что снижает эксплуатационные расходы на ремонт пути.

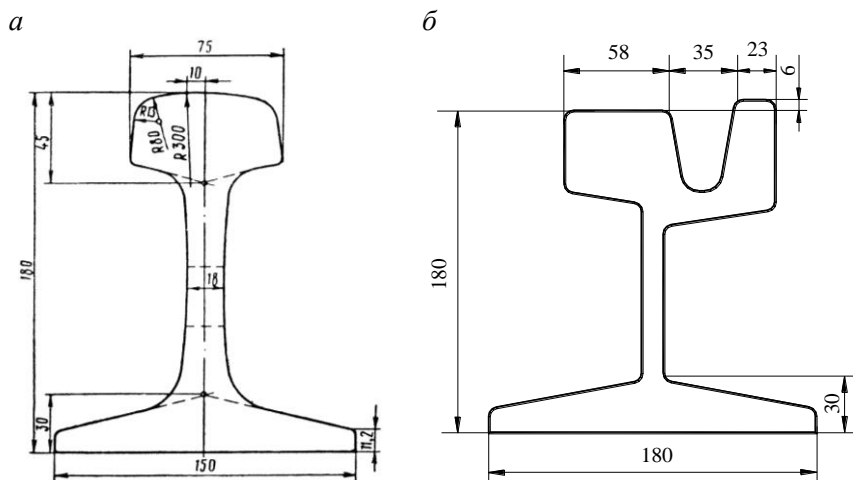


Рис. 2.14. Поперечное сечение рельсов:
a – железнодорожный; *б* – трамвайный

Радиус кривизны средней части поверхности качения в поперечном сечении железнодорожного рельса составляет около 300 мм и около 10 мм у краев. В зоне контакта колеса с рельсом возникают контактные напряжения до 1500 МН/м^2 и более.

Действующая на рельсы сила трения вызывает постепенный равномерный износ головки. Кроме того, износу способствуют и дополнительные силы, вызванные техническим состоянием пути (удары в стыках, перекосы, просадка пути и др.) и подвижного состава (прокат бандажей «лыски», неисправность зубчатых колес редукторов и рессор, отступления в ширине насадки и др.).

Вертикальный износ h_v головок рельсов (рис. 2.15, *a*) на прямых участках пути оценивается уменьшением высоты головки по ее оси симметрии. У рельсов, лежащих на наружных нитях кривых участков пути, от гребней колес образуется боковой износ головки рельса h_b (рис. 2.15, *б*).

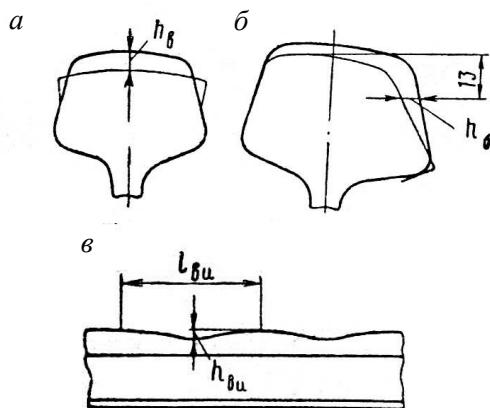


Рис. 2.15. Виды износа рельсов

Вертикальный и боковой износы головки непостоянны по длине рельса. Неравномерный вертикальный износ головки рельса создает волнообразный продольный профиль с длиной $l_{вн}$ и глубиной $h_{вн}$ волны (рис. 2.15, в). Волнообразный износ рельсов вызывает вертикальные перемещения колес трамвая, что может привести к отрыву колеса от рельса и их последующему соударению. Волнообразные неровности имеются также и на колесах.

Чтобы рельс лучше воспринимал динамическое давление колес, его располагают так, чтобы головка была отклонена внутрь колеи и ось симметрии поперечного сечения рельса к вертикали располагалась с уклоном 12° . Такое расположение рельсов называется *подуклонкой рельса*.

После определенного срока службы рельсы заменяют. Причиной замены рельсов может являться предельный износ, при котором не обеспечивается достаточная прочность рельсов и удовлетворительные условия движения трамваев. Как правило, выход рельсов из строя в трамвайных путях вследствие излома – явление редкое, поэтому смена рельсов обычно вызывается их предельным износом.

2.3.4. Шпалы

Шпалы поддерживают рельсы и распределяют их давление на верхнюю часть балластного слоя. Рельс на шпалу опирается через подкладку.

Важной характеристикой шпал является их масса. Чем больше масса отдельной шпалы, тем больше масса пути, принимающая участие в динамическом взаимодействии с колесом, и больше силы взаимодействия колес и рельсов. Массу непропитанной деревянной шпалы при расчетах сил взаимодействия колес с рельсами рекомендуется принимать равной 50 кг, а пропитанной креозотовым маслом – 75 кг.

С целью экономии древесины применяют железобетонные шпалы, которые имеют большую жесткость, чем деревянные. Их масса в зависимости от конструкции изменяется от 200 до 250 кг. Повышенная жесткость железобетонных шпал компенсируется установкой упругих прокладок между рельсом и шпалой. В современной конструкции рельсового пути в зависимости от интенсивности движения подвижного состава укладывается 1440–2000 шпал на 1 км пути.

Современные бесшпальные основания состоят из однослойной или двухслойной монолитной бетонной плиты, в которую заделывают или закрепляют рельсы.

2.3.5. Стыковые и промежуточные скрепления

Стыковые скрепления состоят из накладок и болтов с шайбами, соединяющих рельсы в непрерывную рельсовую нить.

Силы взаимодействия накладок и рельсов в стыке при давлении колеса на рельс с силой G_k распределяются, как показано на рис. 2.16. Из рисунка видно, что ступенька между поверхностями качения стыкуемых рельсов может образоваться только за счет разницы в высоте головок и местного износа накладок.

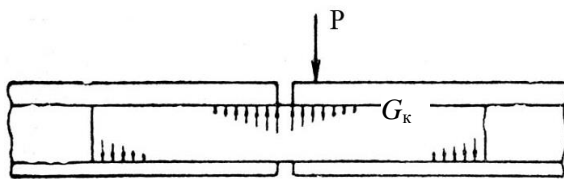


Рис. 2.16. Взаимодействие рельсов и стыковых накладок

Накладки не компенсируют полностью разрыв рельсовой нити, и в стыке под действием колес всегда возникает излом в изогнутой оси рельсовой нити (рис. 2.17) под углом φ , называемым углом

удара. Величина угла удара зависит от износа накладок, опорных поверхностей головок стыкуемых рельсов и их подошв, от силы натяжения стыковых болтов и т. п. Для стыков в хорошем состоянии $\varphi_y = 10\text{--}30'$, а для стыков в удовлетворительном состоянии он может увеличиваться до 1° .

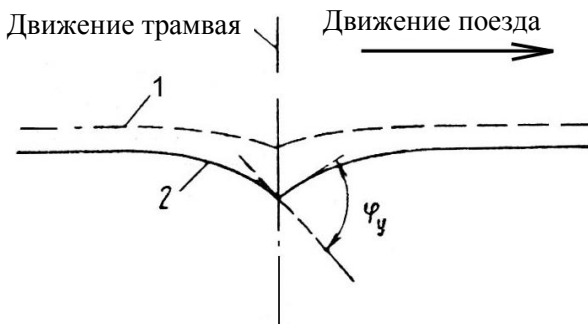


Рис. 2.17. Угол удара в стыке:

1 – поверхность качения рельса в ненагруженном состоянии;
2 – статическая траектория колеса

Так как накладки не могут восстановить жесткость рельсовой нити на изгиб до жесткости рельса между стыками, то упругие просадки рельсов в стыке в 1,25–1,50 раза больше, чем в средних сечениях. Увеличение просадки рельсовой нити в зоне стыка сказывается на длине не более 2–3 м от оси стыка. Вследствие указанных причин создается стыковая вертикальная неровность рельсовой нити.

Сварной стык (сечение рельса, где расположен сварной шов) имеет изгибную жесткость, равную жесткости целого рельса. Однако из-за возможных нарушений технологии сварки рельсов в зоне стыка могут возникать геометрические искажения рельсовой нити. Наиболее часто встречающиеся из них – местные углубления (выбоины), вызванные плохой шлифовкой сварного стыка и пониженной твердостью металла в зоне термического влияния при сварке.

Промежуточное крепление служит для крепления рельсов к шпалам. В простейшем промежуточном креплении при деревянных шпалах к ним костылями одновременно крепят рельс и подкладку. Поэтому такое крепление называется *нераздельным*.

Если в рельсовом пути используются железобетонные шпалы и блоки, применяется *раздельное скрепление*, в котором подкладка прикрепляется к шпале шурупами, а рельс к подкладке – самостоятельными креплениями.

При нераздельном скреплении горизонтальная поперечная динамическая сила давления колеса на рельс в 10 кН отжимает головку рельса на 1,0–1,5 мм, а при раздельном скреплении – в 2–3 раза меньше.

2.3.6. Балластный слой

Балластный слой предназначен для:

- сохранения первоначального расположения шпал в процессе эксплуатации рельсового пути;
- снижения напряжений на основной площадке земляного полотна;
- предохранения земляного полотна от появления различных остаточных деформаций.

Динамические нагрузки, передаваемые шпалами на балластный слой, довольно значительны. Поэтому в балластном слое возникают остаточные деформации. Интенсивность их накопления под различными шпалами неодинакова. Вследствие этого между рельсами, шпалами и балластным слоем образуются зазоры, величина которых изменяется от шпалы к шпале. Поэтому в разных точках рельсового пути при действии одного и того же давления колеса просадки рельса будут различными. Их можно рассматривать как неровности на рельсовом пути, появляющиеся под действием катящегося колеса с нормальной нагрузкой. Неровность такого происхождения называется *силовой*.

Прогиб рельса в стыке является также силовой неровностью, вызванной пониженной жесткостью на изгиб рельсовой нити в стыке.

Если остаточные деформации приблизительно одинаковой величины накапливаются под группой смежных шпал, то рельсы могут прогибаться под действием собственного веса. Неровность по поверхности качения рельса в этом случае появляется и без воздействия колес движущихся вагонов. Такая неровность называется *геометрической*. К неровностям этого вида относятся и неровности, вызванные волнообразным износом головки рельсов, их остаточными искривлениями и т. п.

2.3.7. Основная площадка земляного полотна

Земляным полотном трамвайного пути является выровненный в соответствии с его продольным и поперечным профилями грунт. Основная площадка земляного полотна ограничивает верхнюю часть насыпи или выемки. Земляное полотно создается в основном из местного грунта, прочность которого резко падает при увлажнении. Поэтому основную площадку земляного полотна тщательно выравнивают, делают поперечные скаты для облегчения стока воды, просачивающейся сквозь балластный слой.

Если давление балластного слоя на основную площадку велико, например при больших осевых нагрузках, на ней возникают небольшие углубления (рис. 2.18), в которых скапливается вода. С течением времени эти углубления увеличиваются, что может привести к разрушению земляного полотна. Даже небольшие неровности основной площадки приводят к неравномерной влажности грунта земляного полотна вдоль пути. При замерзании грунта это приводит к неравномерному приподниманию рельсов по сравнению с их первоначальным положением (неравномерное пучение). Такого рода неровности (пучины) возникают и вследствие неравномерного притока грунтовых вод вдоль пути в зону промерзания. Пучины имеют высоту до нескольких десятков миллиметров, а иногда достигают 10–20 см.



Рис. 2.18. Повреждения основной площадки земляного полотна

Устранять образовавшиеся неровности основной площадки земляного полотна – довольно трудоемкая и дорогостоящая работа. Необходимо принимать все меры по предотвращению возникновения неровностей основной площадки земляного полотна, в том числе и посредством рационального проектирования вагонов трамваев, не допуская высоких напряжений на основной площадке земляного полотна.

Итак, рельсовый путь можно рассматривать как балку конечной длины, опирающуюся по всей своей длине на упругое основание, оказывающее в каждой точке на балку **реакцию, пропорциональную прогибу балки z в этой точке.**

Допущение о пропорциональности реакции прогибу рельса является приближением, довольно близким к действительным условиям. Ввести в расчет коэффициент пропорциональности k , называемый *коэффициентом постели*, предложил академик Н. И. Фусов в 1801 году. Принимая это допущение, получают, что интенсивность реакции основания в каждой точке равна kz и измеряется в единицах сила/длина (Н/м); при этом размерность коэффициента k будет сила/длина² (Н/м²). Считается, что основание оказывает реакцию при прогибах рельса как вниз, так и вверх.

На рис. 2.19 показана изогнутая ось рельса, нагруженного сосредоточенной силой G_k , действующей на колесную пару. Эта ось представляет собой волнообразную кривую с постепенно уменьшающимися ординатами. Для большей общности по оси абсцисс отложены величины βx ($\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}$, где EJ – жесткость рельса) вместо абсцисс x .

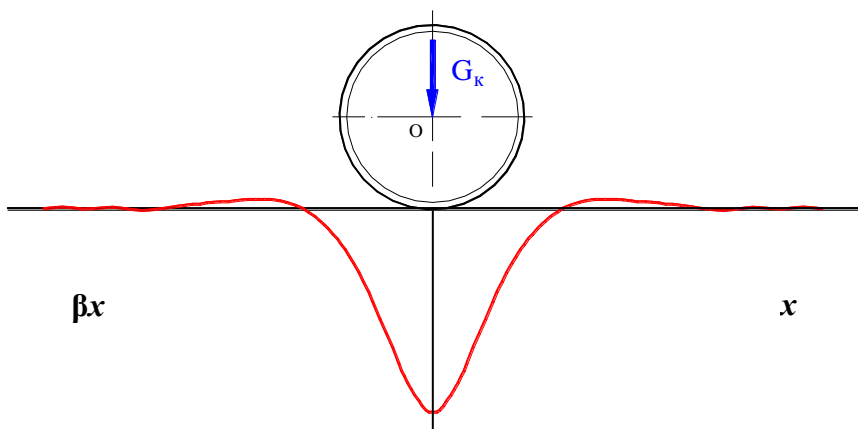


Рис. 2.19. Прогиб рельса под действием нагрузки на колесо

Длина полуволны этой кривой $l_0 = \pi\beta$. Из рисунка и расчета (табл. 2.12) следует, что уже на расстоянии двух полуволн $2l_0$ прогиб рельса $h = -\frac{G_k}{8EJ\beta^3}\eta$ составляет примерно 0,2 % от прогиба под колесом.

Таблица 2.12

Прогиб рельса под действием нагрузки на колесную пару

βx	0,0	$1/4 \cdot \pi$	$1/2 \cdot \pi$	$3/4 \cdot \pi$	$4/4 \cdot \pi = \pi$	$5/4 \cdot \pi$	$6/4 \cdot \pi$	$7/4 \cdot \pi$	$8/4 \cdot \pi = 2\pi$	$9/4 \cdot \pi$
η	-1,0	-0,6448	-0,2079	0,0	0,04321	0,02786	0,00898	0,0	-0,0087	-0,00120

Следовательно, прогибы рельса от действия сосредоточенной силы практически обращаются в ноль при $x = 2l_0$.

2.3.8. Стрелочные переводы

Соединения и пересечения трамвайных путей различных направлений выполняют с помощью специальных частей рельсового пути – стрелок, крестовин и глухих пересечений.

Стрелочный перевод служит для соединения двух путей, сходящихся в один, или для разветвления одного пути на два направления. Каждый одиночный стрелочный перевод состоит из стрелки, крестовины и соединительных комплексных кусков рельсов – прямой и кривой формы.

Глухое пересечение применяют для пересечения двух путей без их взаимного соединения.

Стрелочные переводы и пересечения подразделяются на следующие типы:

- в зависимости от вида обращающего подвижного состава – на железнодорожные и трамвайные;
- в зависимости от конструкции пера – на стрелочные с подвижными перьями и переводы с глухими перьями стрелок;
- в зависимости от способа изготовления – на литые и сборные;
- в зависимости от направления ответвления – на правые и левые.

Трамвайная стрелка состоит из двух стрелочных тел. Каждое стрелочное тело включает в себя неподвижную и подвижную части. К подвижной части стрелки относят стрелочные перья и переводной механизм, к неподвижной – рамные рельсы, контррельсы, хвостовые рельсы, корневое крепление и систему связи всех рельсов стрелки между собой.

Принцип устройства трамвайной стрелки в основном тот же, что и железнодорожной стрелки, но с некоторыми различиями. В железнодорожной стрелке движение поезда направляет одно какое-либо перо, другое при этом отводится назад и в работе не участвует. В трамвайной стрелке оба пера направляют движение и работают одновременно, причем одно перо работает в качестве путевого рельса, другое – в качестве контррельса. При переводе стрелки на другой путь указанное распределение работы между обоими перьями стрелки меняется на обратное.

Наиболее распространены в трамвайных путях литые и сборные стрелки, элементы которых выполнены из отрезков желобчатых трамвайных рельсов.

При расчете взаимодействия трамвая со стрелочными переводами (рис. 2.20) наибольший интерес представляют стрелка, переводная кривая и крестовина с контррельсами. При движении трамвая по переводной кривой возникают большие колебания кузова, которые в неблагоприятных условиях могут привести к сходу трамвая с рельсов. Проход по стрелке и крестовине вызывает значительные силы инерции в неподдресоренных массах трамвая.

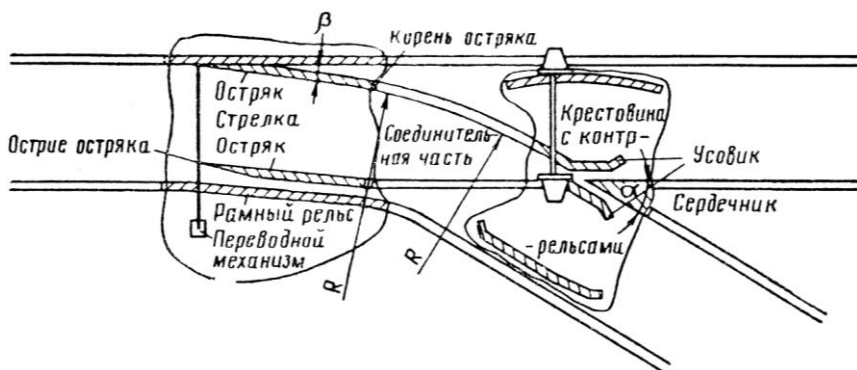


Рис. 2.20. Схема обыкновенного одинарного стрелочного перевода

При движении трамвая по стрелке различают следующие два момента: движение на боковой путь – «против шерсти» и движение с бокового пути – «по шерсти». В первом случае в самом начале накатывания колеса на остряк при наличии подреза гребня (особенно с остроконечным накатом) возможно попадание его в зазор между рамным рельсом и остряком. По действующим нормам содержания стрелочных переводов этот зазор (неприжатие остряка к рамному рельсу) должен быть не более 4 мм. Попадание гребня колеса в этот зазор неизбежно вызовет сход трамвая с рельсов. Для обеспечения безопасности движения необходимо строгое соблюдение установленных норм по вертикальному подрезу гребней колес.

Двигаясь по стрелке «против шерсти», колесо на некотором расстоянии от начала остряка придет в соприкосновение с его боковой гранью. В результате колесная пара должна будет изменить направление своего движения. Произойдет как бы соударение колеса с рельсовой нитью в горизонтальной плоскости. Чем меньше угол β между рамным рельсом и остряком, тем меньше сила удара при «противошерстном» движении трамвая на боковой путь.

При «пошерстном» движении трамвая по стрелке с бокового пути, когда колесо имеет большой износ (прокат), может произойти отжатие рамного рельса из-за того, что наружная часть поверхности качения колеса опустится ниже поверхности качения рамного рельса.

Чтобы рассчитать силы взаимодействия колес и стрелки, необходимо знать жесткости рамного рельса и остряка в горизонтальном направлении. *Жесткость рамного рельса* в горизонтальном направлении может быть принята в 1,5 раза больше, чем у рельсовой нити вне стрелки. Это обусловлено, прежде всего, более жесткой конструкцией промежуточного скрепления. *Жесткость остряка* в горизонтальном направлении за пределами зоны прилегания к рамному рельсу для сравнительных расчетов может быть принята равной жесткости рельсовой нити.

Перекатывание колесной пары с усовика на сердечник крестовины (рис. 2.21) приводит к искажению траектории центра масс колеса вследствие изменения радиусов (r_1 , r_2 , r_3) фактических кругов качения колеса в процессе его движения по крестовине, а также вследствие неравномерного износа крестовины по ее длине. Это искажение, если разные колеса будут иметь значительный (до 7 мм) и неодинаковый износ, нельзя устранить ни изменением продольного

профиля усовика и крестовины, ни снижением норм их предельного износа. Размеры возникающей неровности q_k меньше у малоизношенной крестовины. Следовательно, движение колес по крестовинам всегда сопровождается ударом.

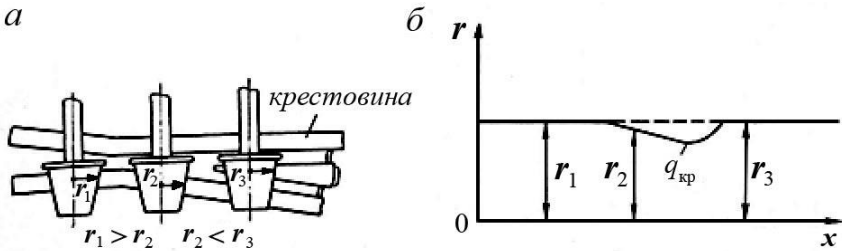


Рис. 2.21. Перекатывание колеса по крестовине:
 а – положение колесной пары в плане; б – траектория центра колеса;
 $q_{кр}$ – неровность крестовины

Жесткость пути в пределах крестовины в 1,5–2,0 раза больше, чем в середине рельсового звена. Это объясняется тем, что крестовина намного массивнее рельса. Следовательно, и масса пути, принимающая участие в ударных процессах, в пределах крестовины превышает массу типовой конструкции пути за пределами стрелки.

В расчетах рекомендуется приведенную массу в пределах крестовины с сердечником, отлитым вместе с наиболее изнашиваемыми частями усовиков, принимать в 2 раза больше приведенной массы соответствующего рельса, а для цельнолитой крестовины – в 4 раза больше.

Кроме вертикальных ударов колес при движении их по крестовине могут иметь место удары в горизонтальной плоскости. Например, колесо ударяет по отведенной части усовика при «пошерстном» движении трамвая, когда оно входит в желоб между сердечником и усовиком.

Горизонтальная жесткость системы «колесная пара – крестовина» определяется величиной деформации входящих в нее соответствующих элементов. В цельной крестовине усовики составляют единое целое тело с сердечником. Для конструкций крестовин, когда усовики изготавливаются отдельно и присоединяются к крестовине специальными болтами, деформации этого узла могут быть значи-

тельными. За счет силы взаимодействия колесной пары и усовиков крестовины деформации узла несколько уменьшаются.

Жесткость колесной пары в большой степени зависит от конструкции колеса и размеров оси. Для приближенных расчетов можно принимать горизонтальную жесткость системы «усовики крестовины – колесная пара» равной 10 МН/м.

2.3.9. Дорожное покрытие трамвайных путей

Дорожное покрытие в трамвайных путях устанавливают для полного или частичного использования трамвайного полотна безрельсовым транспортом, предохранения путевой конструкции от проникновения внутрь пути воды и улучшения внешнего вида путевого полотна и улицы в целом. Это требование, а также конструкция основания и верхнего строения трамвайных путей определяют вид дорожного покрытия в путях и междупутье.

По конструкции и материалам в трамвайных путях применяют те же типы покрытий, что и на городских дорогах: штучные из булыжного камня, брусчатки и других подобных материалов, сплошные из асфальтобетона и цементобетона и железобетонные из сборных плит. Основным требованием, предъявляемым к дорожному покрытию трамвайных путей, является его водонепроницаемость и устойчивость в месте сопряжения с рельсами. Дорожное покрытие для путей трамвая выбирают с учетом типа путевой конструкции, расположения путей по отношению к проезду, типа покрытия на прилегающей к путям проезжей части и значения улицы. При укладке путей в одном уровне с дорожным покрытием выполняют однородное покрытие в путях и проезжей части улицы.

В настоящее время в качестве дорожного покрытия в трамвайных путях все чаще используются сборные железобетонные покрытия. Для обособленного полотна часто применяют легкие армированные бетонные плиты. В перспективе на трамвайном полотне будут применяться крупноразмерные покрытия из сборного железобетона, рассчитанные на автомобильную нагрузку. Применение сборных железобетонных покрытий на трамвайных путях позволит активнее внедрить механизацию работ.

2.3.10. Неровности рельсового пути

В плане и в продольном профиле рельсовые нити представляют собой волнообразные кривые, амплитуды и длины волн которых изменяются по длине пути. Неровности продольного профиля слагаются из двух частей: геометрических неровностей, определяемых искривленностью ненагруженного рельса, и силовых (динамических) неровностей, возникающих вследствие различия жесткости рельсового основания в разных сечениях пути (например, из-за зазоров между рельсами и шпалами).

Все неровности продольного профиля пути разбивают на две группы: закономерные и не закономерные (случайные).

К **закономерным неровностям** относятся, например, неровности, обусловленные просадкой стыков. Период такой неровности равен длине рельса, т. е. 12,5 м или 25 м, а глубина (амплитуда аппроксимирующей гармоники, определяемая совокупностью геометрических и динамических неровностей) принимается в расчете до 3–5 мм для пути в хорошем состоянии и до 8–10 мм – для пути в удовлетворительном состоянии.

Наиболее типичные виды закономерных неровностей и соответствующие им эмпирические формулы показаны на рис. 2.22 [4, 5].

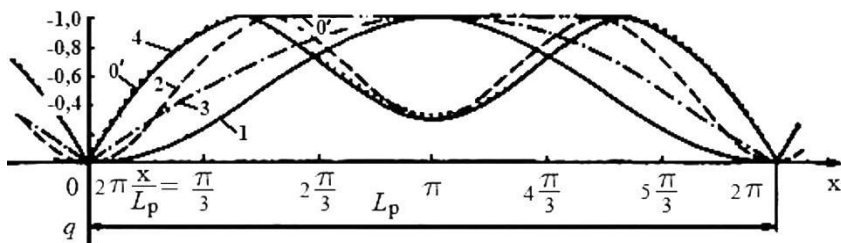


Рис. 2.22. Вертикальная неровность рельсового звена пути с болтовыми стыками: o — осредненная из замеренных неровностей; 1 — упрощенная, аппроксимирующая формула (2.1); $2, 3, 4$ — аппроксимация соответственно формулами (2.2), (2.3) и (2.4)

На бóльшей части рельса головка лежит приблизительно на одном уровне o' , и только в зоне стыка, на расстоянии 2–3 м от него, рельсовая нить получает заметные дополнительные просадки. Эти просадки меньше для более тяжелых рельсов. Если для рельса Р50

глубину стыковой поверхности принять за 100 %, то для рельса Р65 она будет равна около 75 %.

В ориентировочных расчетах колебаний трамвая, движущегося со скоростью v по пути с рельсовыми звеньями длиной L_p и стыковыми неровностями, в качестве функции возмущения принимаются:

$$q = A(\cos \omega t - 1); \quad (2.1)$$

$$q = A_1(\cos \omega t - 1) + A_2(\cos 2\omega t - 1), \quad (2.2)$$

где A и A_1 – амплитуды гармоник одnogорбой составляющей неровности;

A_2 – амплитуды гармоник двугорбой составляющей неровности;

ω – частота воздействия стыков пути на трамвай, движущийся со скоростью v , $\omega = 2\pi v / L_p$.

Приведенные выше формулы не учитывают удары колес на стыках. Более точно аппроксимируется реальная стыковая неровность эмпирическими формулами вида:

$$q = -a \left| \sin \frac{1}{2} \omega t \right|; \quad (2.3)$$

$$q = - \left| a_1 \sin \frac{1}{2} \omega t + a_2 \sin \frac{3}{2} \omega t \right|. \quad (2.4)$$

Эти функции отображают переломы на стыках рельсов.

Значения входящей в формулы амплитуды можно принимать в следующих пределах (A , A_1 , a , a_1 – для хорошего состояния пути, A_2 , a_2 – для удовлетворительного): для стыкового пути – $A = A_1 = 3-10$ мм; $A_2 = 2-8$ мм; $a = 6-25$ мм; $a_1 = 8-20$ мм; $a_2 = 4-10$ мм. Для бесстыкового пути значения A , A_1 и A_2 принимают в 1,5–2,0 раза меньше.

Размеры неровностей рельсовых нитей на смежных звеньях неодинаковы, и при выполнении расчета на накопление колебаний кузова трамвая (переходной процесс) следует оперировать не максимальными значениями стыковых неровностей, а уменьшенными приблизительно на 25 %.

Незакономерные неровности обусловлены просадкой группы смежных шпал и неровностями на головке рельса, полученными при прокате и вследствие неравномерного износа. При неравномерном износе образуются неровности различной длины: длинные – размером 1–3 м и короткие – 0,03–0,05 м. Неровности длиной волны для рельсов Р50 имеют средние расчетные значения амплитуд порядка 1–2 мм, короткой – 0,1–0,5 мм, т. е. меньшим длинам неровностей соответствует и меньшая их глубина.

Смежные неровности различаются по длине и амплитуде. Неровности с близкими значениями длин образуют отдельные, иногда четко выраженные группы. Обычно в группе 2 или 3 волны, реже – 4. Длина волн в группе может отличаться на 20–30 %.

Перекосы, под которыми понимаются разносторонние отклонения по уровню обеих рельсовых нитей в сечениях, расположенных на некотором расстоянии (менее 25 м) вдоль оси пути, допускаются не более 7 мм.

Отклонения действительного положения рельсовых нитей от проектного в плане бывают двух разновидностей: *периодические* и *непериодические*.

Периодические отклонения вызваны конструкцией пути и особенностями воздействия подвижного состава. На кривых участках пути рельсовые нити лежат фактически не по проектной кривой, а по некоторому криволинейному многоугольнику. Это происходит вследствие недостаточной жесткости стыковых соединений. В зависимости от радиуса кривой и тщательности содержания рельсового пути величина отклонений этого рода, измеренная от среднего положения рельсов в кривой, независимо от типа рельсов может колебаться от 1 до 10 мм.

На прямых участках пути горизонтальные отклонения пути возникают из-за непрямолинейности концов рельсов. В некоторых случаях на пути из новых рельсов уже имеются горизонтальные неровности в стыках размером 1–2 мм. Можно принимать, что длина таких неровностей распространяется на 2–3 м в каждую сторону от оси стыка.

В результате извилистого движения трамвая в рельсовом пути постепенно накапливаются неровности в горизонтальной плоскости. Неровности имеют длину волны, которая связана с длиной волны извилистого движения трамвая и практически не зависит от длины

рельса. Такие неровности наблюдаются как на пути с болтовыми стыками, так и на бесстыковом. Длина волны в этих случаях может приниматься равной 10–15 м при амплитуде 1–3 мм.

Непериодические отклонения в положении рельсовых нитей в плане обусловлены неравномерным накоплением остаточных деформаций в каждой отдельной шпале и в балласте под каждой шпалой. Эти отклонения имеют волнообразный характер с длиной волны от одного до нескольких метров с амплитудой 1–3 мм. Меньшим длинам волн соответствуют и меньшие амплитуды.

Неровности на каждом отрезке пути порождаются многими случайными причинами, учесть которые невозможно. Общая неровность рельсовых нитей как функции их длины x или времени t , величина которой при каждом значении аргумента является случайной, называется *случайной функцией*. Однократно записанную на большом отрезке пути неровность рельсовых нитей называют *реализацией случайной функции*. Отдельные повторные реализации случайной функции для одного и того же участка однородного по конструкции и состоянию рельсового пути или его длинных отрезков в общем случае различны между собой. Но если вычисленные для них статистические характеристики: средняя величина отклонений, или математическое ожидание; дисперсия, или мера рассеивания отдельных отклонений от средней величины; средние квадратические отклонения – практически не отличаются от характеристик, вычисленных на основе большого числа реализаций случайной функции для всего данного участка пути, то такую случайную функцию называют *стационарной* или *эргодической*.

Для изучения динамики трамвая, движущегося по участку пути, случайные неровности которого характеризуются стационарной и эргодической функцией, достаточно поставить эксперимент на представительной части длины этого участка. При расчетах в качестве возмущающей функции используется соответствующий отрезок реализации случайной функции. Результаты исследования позволяют достаточно полно представить поведение трамвая на пути заданной конструкции и технического состояния, однако этот результат громоздок.

Применив так называемый спектральный метод, можно получить те же характеристики аналитическим путем. Для этого выполняется соответствующая обработка экспериментальных данных реализации

случайной функции неровностей пути $q(t)$ и получают ее корреляционную (автокорреляционную) функцию, имеющую вид:

$$k(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q(t)q(t + \tau)dt,$$

где $q(t)$ – реализация случайной функции;

τ – аргумент корреляционной функции (временной сдвиг случайного процесса);

T – продолжительность реализации случайной функции.

Из приведенного выражения следует, что корреляционная функция представляет собой математическое ожидание произведения ординат реализации случайной функции, взятых со сдвигом τ друг относительно друга.

По найденной корреляционной функции $k(\tau)$ с помощью преобразования Фурье отыскивается спектральная функция $S(\omega)$ неровности рельсового пути:

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} k(\tau) \cos \omega \tau d\tau,$$

где ω – частота гармоник вынужденных колебаний.

Спектральная функция представляет собой как бы коэффициенты разложения полученной экспериментальным путем реализации случайной функции неровностей пути на элементарные гармоники, одновременное воздействие которых на движущийся трамвай в статистическом смысле эквивалентно воздействию неровностей, имеющих на данном участке рельсового пути.

2.3.11. Переходные кривые автомобильных дорог и трамвайных путей

Обычно перед кривыми участками дороги или рельсового пути устраиваются *переходные кривые* (рис. 2.23). Переходные кривые используются для плавного сопряжения кривой с примыкающей прямой как в плане, так и в профиле дороги и рельсового пути.



Рис. 2.23. Профиль и план переходной кривой:

- а* – отвод возвышения наружной рельсовой нити (профиль переходной кривой);
б – план переходной кривой по оси пути; *в* – изменение центробежной силы

На рис. 2.23 приняты следующие обозначения: R – радиус круговой кривой; ρ – переменный радиус переходной кривой; K – кривизна; L_0 – полная длина переходной кривой; h_0 – возвышение наружного рельса в круговой кривой; ϕ_0 – полный угол поворота переходной кривой; X_0, Y_0 – соответственно абсцисса и ордината конца переходной кривой (КПК); $L_{отв}$ – длина отвода возвышения; γ – угол наклона к горизонту наружной рельсовой нити; h – возвышение наружного рельса в кривой; L – длина переходной кривой; ϕ – угол поворота; X, Y – абсцисса и ордината точек переходной кривой; $КОВ$ и $НОВ$ – соответственно конец и начало отвода возвышения наружной рельсовой нити; $НПК$ и $КПК$ – соответственно начало и конец переходной кривой.

Переходная кривая рельсового пути одновременно используется для устройства:

- отвода возвышения наружной рельсовой нити круговой кривой;
- отвода уширения колеи;
- отвода увеличения междупутного расстояния в случаях концентрического расположения путей на одном полотне.

Требования, предъявляемые к переходной кривой, математически определяются пятью условиями, изложенными в табл. 2.13 и на рис. 2.23. На основании этих условий подбираются алгебраические уравнения переходной кривой, рассчитываются координаты точек X , Y , и по ним разбиваются переходные кривые на местности. При этом за центр системы координат принимается НПК.

Таблица 2.13

Требования, предъявляемые к переходной кривой

№ п/п	Наименование элемента	Требования, предъявляемые к элементам в		
		НПК	КПК	интервале от НПК к КПК
1	ρ $K = 1 / \rho$	$\rho = \infty$ $K = 0$	$\rho = R$ $K = 1 / R$	Меняются непрерывно и монотонно
2	φ	0	φ_0	$\varphi = \int_0^L K dL$
3	γ	0	0	$Y = \int_0^L \sin \varphi dL$
4	γ dK / dL	0 0	0 0	Меняются непрерывно, не превышая допустимых значений
5	d^2K / dL^2	0	0	

На практике очевидны первые три условия о недопустимости внезапных изменений в НПК, КПК и на протяжении всей переходной кривой кривизны K , углов поворота φ , ординат Y и по монотонности их изменений.

Четвертое условие связано с тем, что при движении вагона трамвая его колеса, катящиеся по наружной нити, будут в начале и в конце переходной кривой оказывать ударно-динамические воздействия в вертикальной плоскости на рельсы наружной рельсовой нити. Эти воздействия будут возникать внезапно. Во избежание этого необходимо, чтобы в НПК и КПК $\gamma = 0$ и на всем протяжении переходной кривой он изменялся непрерывно.

Пятое условие. Ввиду того, что на переходной кривой осуществляется отвод возвышения наружного рельса и расширение колеи,

и так как переходная кривая имеет переменный радиус ρ , движение вагона по этой кривой будет неустановившимся. В связи с этим возникает ряд дополнительных сил, не имеющих места ни на прямой, ни на круговой кривой.

При движении подвижного состава массой m по кривой радиусом R со скоростью v появляется сила инерции $F_{j,цб}$, которую называют *центробежной силой*, определяемой выражением

$$F_{j,цб} = m \frac{v^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} = ma_{цб},$$

где G – вес подвижного состава;

g – ускорение силы тяжести;

$a_{цб}$ – центробежное ускорение.

Эта сила вызывает боковую деформацию шин, что приводит к их повышенному износу и увеличению расхода топлива, перераспределению веса троллейбуса по бортам, а при значительной скорости может вызвать боковое скольжение, занос или опрокидывание троллейбуса. В ночное время свет фар освещает на криволинейном участке меньшую длину дороги, чем на прямолинейном. При движении по кривой на троллейбус действуют две силы, приложенные к его центру тяжести: $F_{j,цб}$ – центробежная сила; G – вес троллейбуса. Проектируя эти силы на направление поперечного уклона, получаем поперечную (боковую) силу:

$$F_{бок} = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha \pm G \sin \alpha.$$

Но угол наклона кузова α троллейбуса невелик и можно принять $\cos \alpha \approx 1$; $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = i$; $G = mg$. Тогда

$$F_{бок} = \frac{mv^2}{R} \pm mgi,$$

где i – поперечный уклон проезжей части.

Откуда значение радиуса кривой в плане будет определяться по формуле

$$R = \frac{v^2}{\left(\frac{F_{\text{бок}}}{mg} i\right) g} = \frac{v^2}{(\mu \pm i) g},$$

где μ – коэффициент поперечной силы.

Коэффициент поперечной силы μ учитывает влияние центробежной силы на троллейбус и пассажиров:

- при $\mu < 0,10$ кривая пассажирами не ощущается;
- при $\mu = 0,20$ кривая ощущается, и пассажир испытывает неудобства;
- при $\mu = 0,30$ въезд с прямого участка на кривую ощущается как толчок, наклоняющий пассажиров в бок;
- при $\mu > 0,6$ троллейбус может опрокинуться.

Для обеспечения удобства движения пассажиров по кривой рекомендуется принимать $\mu \leq 0,20$.

Если трамвай движется в кривой, то центробежная сила оказывает боковое воздействие на рельсовый путь, перераспределение вертикальных нагрузок на рельсы обеих рельсовых нитей и перегрузку наружного рельса. В результате происходит усиленный износ рельсов наружной нити. Кроме того, центробежная сила может вызвать сдвиг (отбой) рельсовой нити по шпалам, разуклонку рельсов и в результате расширение колеи или сдвиг рельсошпальной решетки по балласту (нарушение правильного положения пути в плане, т. е. нарушение рихтовки пути). Отрицательное действие центробежной силы на этом не заканчивается, она является определяющей и при вписывании трамвая в кривую.

Горизонтально действующим силам пассажир сопротивляется с большим напряжением, особенно ввиду внезапности их воздействия, т. к. пассажир не знает о въезде подвижного состава в кривую.

Кривые участки автомобильных дорог. Положение оси автомобильной дороги на местности называется *трассой*. Для лучшей ориентировки трассу делят на километры и на стометровые отрезки, называемые *пикетами*. Пикеты и километры последовательно нумеруют.

При радиусах в плане менее 2000 м для повышения безопасности движения и удобства управления электробусом, автомобилем устра-

иваются переходные кривые и виражи. Устройство переходных кривых обусловлено следующими требованиями:

- необходимостью обеспечить плавный поворот управляемых колес электробуса на угол, соответствующий радиусу круговой кривой;
- необходимостью постепенного нарастания центробежной силы, чтобы не допустить бокового толчка при въезде на круговую кривую.

Для устройства переходных кривых автомобильных дорог и рельсового пути используют кривые – радиоидальную спираль или кубическую параболу. При проектировании и разметке переходной кривой применяется *параметр переходной кривой* (длина переходной кривой и радиус круговой кривой), который обозначают через $C_{\text{пар}}$. Покажем на примере радиоидальной спирали, что представляет параметр этой переходной кривой.

Так, для любой точки переходной кривой возвышение рельса h вычисляется по формуле

$$h = \frac{s_1 v^2}{g \rho} = L_{\text{пер}} i,$$

где s_1 – расстояние между осями рельсов;

v – скорость;

$L_{\text{пер}}$ – длина переходной кривой;

i – уклон отвода возвышения, $i = h / L$;

ρ – текущий радиус переходной кривой.

Откуда текущее значение длины переходной кривой:

$$L_{\text{пер}} = \frac{s_1 v^2}{g i} \cdot \frac{1}{\rho}.$$

В полученное выражение при установившейся скорости v входят постоянные величины s_1 , g , i . Поэтому, введя обозначение $C_{\text{пар}} = s_1 v^2 / (g i)$, получим, что

$$L_{\text{пер}} = C_{\text{пар}} \frac{1}{\rho} = C_{\text{пар}} K_{\text{пер}}, \quad (2.5)$$

где $C_{\text{пар}}$ – параметр переходной кривой;

$K_{\text{пер}}$ – кривизна переходной кривой.

Согласно (2.5) кривизна $K_{пер}$ изменяется прямо пропорционально длине дуги L кривой. Такому условию удовлетворяет только особая кривая, которая называется радиоидальной спиралью (клотоидой) в натуральных координатах ρ и L (рис. 2.24).

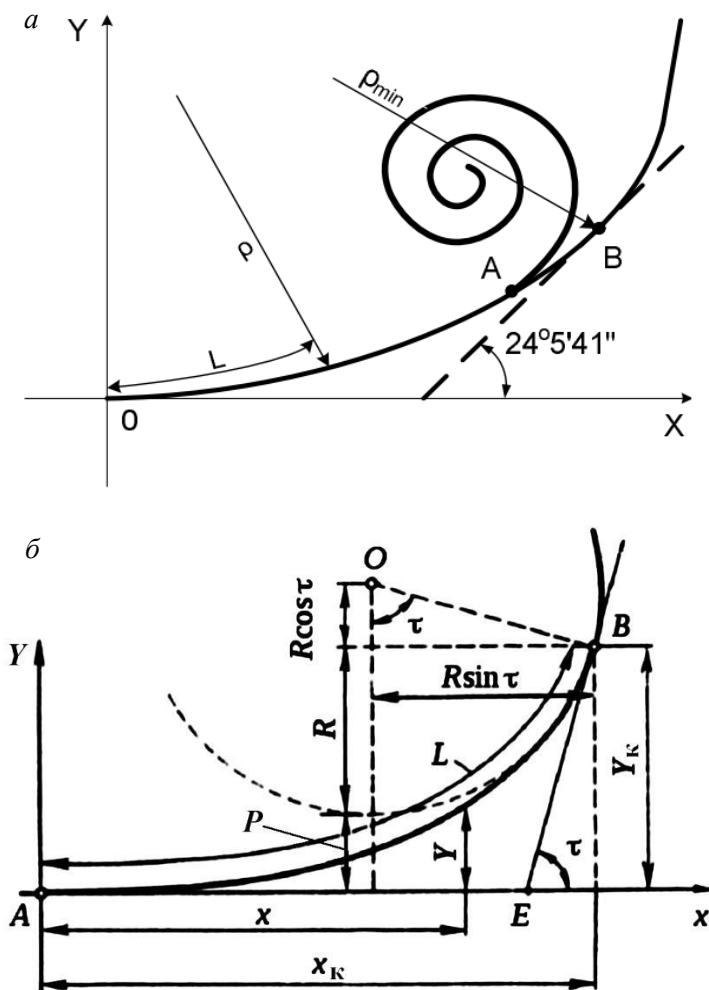


Рис. 2.24. Интерпретация предела применения радиоидальной спирали и кубической параболы в качестве переходной кривой:

a – клотоида; b – элементы клотоиды

Из (2.5) следует, что в конце переходной кривой при $L_{\text{пер}} = L_0$ (здесь L_0 – полная длина переходной кривой) $\rho = R$. Тогда параметр переходной кривой:

$$C_{\text{пар}} = RL_0.$$

Объединяя оба выражения для параметра $C_{\text{пар}}$, получим, что параметр радиоидальной кривой можно представить выражением

$$C_{\text{пар}} = \frac{s_1 v^2}{gi} = RL_0.$$

Первое выражение для $C_{\text{пар}}$ называют его физической интерпретацией, второе – геометрической интерпретацией. Из приведенных выше выражений видно, что параметр переходной кривой $C_{\text{пар}}$ выражается в единицах площади (м^2).

Для примера использования параметра переходной кривой запишем уравнение радиоидальной спирали в декартовых координатах:

$$Y = \frac{X^3}{6C_{\text{пар}}} \left(1 + \frac{2}{35} \cdot \frac{X^4}{C_{\text{пар}}^2} + \frac{293}{237\,000} \cdot \frac{X^5}{C_{\text{пар}}^4} + \dots \right).$$

Ряд в скобках быстро сходится ввиду малости L по сравнению с $C_{\text{пар}}$, поэтому практически во всех случаях представляется возможным ограничиться первыми членами ряда. В таком случае $X = L$, а $Y = L^3 / (6C_{\text{пар}})$. Заменяв L его значением через X , получим:

$$Y = \frac{X^3}{6C_{\text{пар}}}.$$

Последнее выражение является уравнением кубической параболы. Она отличается от радиоидальной спирали тем, что ее кривизна меняется пропорционально не протяжению длины L переходной кривой, а ее проекции на ось X . Поэтому применять ее для переходных кривых можно лишь в ограниченных пределах.

В случае, когда отсутствует круговая кривая, в качестве переходной кривой применяется *биклотоида* – кривая, состоящая из двух одинаково направленных клотоид с одинаковыми параметрами без включения круговой кривизны, в точке соприкосновения которых они имеют одинаковые радиусы и общую касательную.

Длину переходной кривой можно определить и по следующей формуле:

$$L_{\text{пер}} = \frac{v^3}{47 jR},$$

где v – расчетная скорость, км/ч;

47 – коэффициент, приводящий размерности в км;

j – нарастание центробежного ускорения, $j = 0,2-0,5 \text{ м/с}^2$.

Чем меньше нарастание центробежного ускорения, тем плавнее переход с прямого участка к криволинейному. Полученная по расчету длина переходной кривой должна быть не менее рекомендованной СП34.13330.2012 (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Зависимость длины переходной кривой
от радиуса круговой кривой

Радиус круговой кривой, м	600	800	1100	1150	2200	2250	3300	4400	5500	600– 1000	1000– 2000
Длина переходной кривой, м	440	445	550	660	770	880	990	1100	1110	120	100

Виращ – односкатный поперечный профиль, его устраивают в пределах круговой кривой. Участок постепенного плавного перехода от двухскатного профиля к односкатному называют *отгоном вираща*. Уклон вираща рассчитывается по формуле

$$i_{\text{вир}} = \frac{v^2}{127R} - \mu,$$

где v – расчетная скорость, км/ч;

μ – коэффициент центробежной силы, принимаемый равным 0,05–0,10 для дорог I и II категории и 0,15 – для дорог III категории и ниже.

В том случае, когда уклон виража по расчету окажется меньше поперечного уклона проезжей части двухскатного профиля или отрицательным, вираж не устраивают. Однако в целях повышения безопасности движения, учитывая психологическое воздействие виража на водителя, целесообразно устроить вираж с уклоном, равным уклону двухскатного профиля. Максимальный уклон виража не должен превышать значений, приведенный в СП34.13330.2012 (таб. 2.15).

Таблица 2.15

Зависимость поперечного уклона проезжей части на вираже от радиуса кривых

Радиусы кривых в плане, м	Поперечный уклон проезжей части виража, %		
	основной, наиболее распространенный		в районах с частым гололедом
	на дорогах категории I–V	на подъездных дорогах к промышленным предприятиям	
3000–1000 для дорог I категории	20–30	–	20–30
2000–1000 для дорог II–V категории	20–30	–	20–30
1000–800	30–40	–	30–40
800–700	30–40	20	30–40
700–650	40–50	20	40
650–600	50–60	20	40
600–500	60	20–30	40
500–450	60	30–40	40
450–400	60	40–60	40
400 и менее	60	60	40

Длину отгона виража – участка перехода от двухскатного поперечного профиля к односкатному при вращении вокруг оси дороги – считают по формуле

$$L_{\text{отг}} = \frac{0,5B(i_{\text{п}} + i_{\text{в}})}{i_{\text{доп}}},$$

где B – ширина проезжей части с учетом краевых полос;

$i_{\text{доп}}$ – дополнительный к продольному уклону дороги уклон внешней кромки проезжей части на участке отгона виража, который не должен превышать для дорог I и II категории 5 %, для дорог других категорий – 10 % (рис. 2.25).

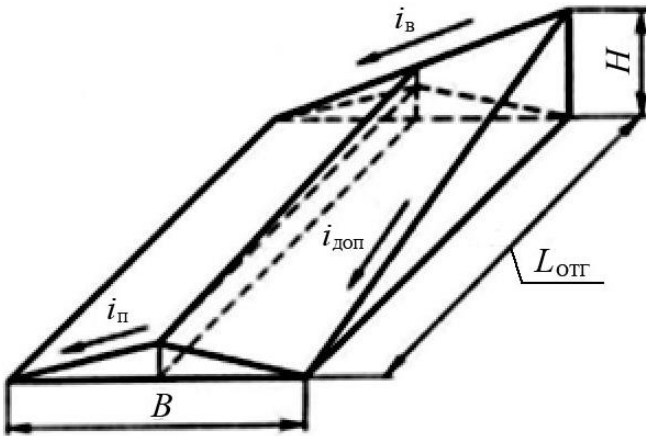


Рис. 2.25. Схема к расчету отгона виража

Для двухполосной проезжей части $B = 2(b + a)$, где b – ширина проезжей части с учетом краевых полос; a – ширина краевой полосы.

Участок отгона виража совмещается с переходной кривой, поэтому если рассчитанная длина отгона виража окажется меньше длины переходной кривой, то они принимаются равными. Если $L_{\text{отг}} > L_{\text{пер}}$ – увеличивают длину переходной кривой.

Кривые участки рельсового пути. Для уменьшения вредного влияния центробежной силы в кривых приподнимают наружную рельсовую нить над внутренней, т. е. устраивают возвышение h наружной рельсовой нити (рис. 2.26).

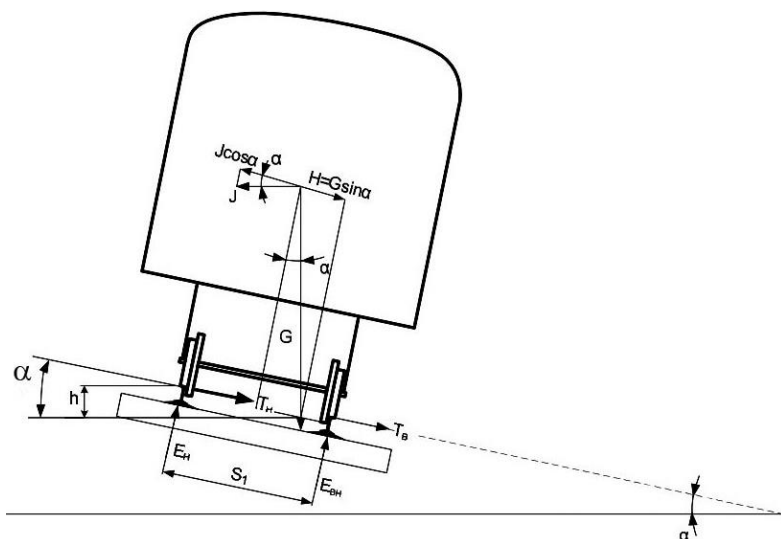


Рис. 2.26. Положение вагона в кривой с возвышением наружного рельса

При этом искусственно создается противодействующая центростремительной силе центробежная сила, которая равна горизонтальной составляющей веса вагона, определяемой по формуле

$$F_{\text{цс}} = G \sin \alpha_{\text{д}} = G \frac{h}{s_1} = mg \frac{h}{s_1} = ma_{\text{цс}},$$

где s_1 – расстояние между осями рельсов;

$a_{\text{цс}}$ – центробежное ускорение.

Из рис. 2.26 видно, что силе $F_{j,\text{цб}} \cos \alpha_{\text{д}}$ противодействует центробежная сила $F_{\text{цс}}$. При максимально допускаемом возвышении $h = 150$ мм и расстоянии между осями рельсов $s_1 = 1600$ мм $\cos \alpha_{\text{д}} = 0,999999 \approx 1$. Поэтому разность между центробежной и центробежной силами составит:

$$F_{j,\text{цб}} - F_{\text{цс}} = m \left(\frac{v^2}{R} - \frac{g}{s_1} h \right) = ma_{\text{неп}},$$

где $a_{\text{неп}}$ – непогашенное боковое (поперечное) ускорение.

Из полученного выражения видно, что *непогашенное боковое ускорение* равно:

$$a_{\text{неп}} = \frac{v^2}{R} - \frac{g}{s_1} h. \quad (2.6)$$

При этом следует иметь в виду, что $(+a_{\text{неп}})$ соответствует непогашенному центробежному ускорению, а $(-a_{\text{неп}})$ – центростремительному.

При движении вагона в кривых на путь передаются *горизонтальные поперечные силы*:

- *направляющие* определяют боковой износ головки рельсов и гребней колес, поскольку они главным образом передаются на рельс через гребень колеса;

- *боковые силы* вызывают изгиб, кручение и разуклонку рельсов, т. е. влияют на устойчивость рельсовых нитей и рельсовой колеи в целом;

- чрезмерно большие *рамные силы* могут вызвать поперечную сдвигку пути, поскольку эти силы являются внешними по отношению к пути.

Заметим, что горизонтальные поперечные силы *находятся в прямой зависимости от уровня непогашенного ускорения* $\pm a_{\text{неп}}$. Поперечные непогашенные ускорения и непогашенные центробежные и центростремительные силы влияют на:

- определение норм устройства рельсовой колеи в кривых;
- характер воздействия вагонов на рельсовый путь;
- вписываемость тележек вагонов в кривые участки пути, т. е. на ширину колеи.

Поэтому динамический параметр допустимое непогашенное ускорение $a_{\text{неп}}$ принят в качестве оценочного при проектировании, устройстве и содержании рельсовой колеи в кривых, а также расчете ходовой системы вагона.

Уравнение, по которому рассчитывается возвышение наружной рельсовой нити над внутренней, определяется по формуле

$$h = \frac{s_1}{g} \frac{v^2}{3,6^2 R} - \frac{s_1}{g} a_{\text{неп}}, \quad (2.7)$$

где s_1 – расстояние между осями рельсов, мм;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

v – скорость движения вагона, км/ч;

R – радиус кривой, м;

$a_{\text{неп}}$ – непогашенное ускорение, м/с^2 ;

h – возвышение наружного рельса, мм.

Возвышение наружной рельсовой нити над внутренней обычно устраивают за счет ее поднятия с сохранением положения внутренней нити. Целесообразнее повышать наружную рельсовую нить на $0,5h$ и понижать внутреннюю на эту же величину. При прохождении таких кривых из-за возвышения вагоны не изменяют высотное положение своих центров тяжести, что особенно важно для линий с высокими скоростями движения. В тоннелях устройство возвышения таким способом дает экономию в их высотах.

Следовательно, для обеспечения одинаковой нагрузки рельсов в кривых участках пути превышение наружной рельсовой нити нужно выбирать с учетом скорости движения трамвая и радиуса кривой. Важно обеспечить максимальные допустимые скорости движения в кривых, так как в условиях городской застройки их протяженность доходит до 20–25 % общей длины транспортной сети и снижение скорости трамвая на кривых резко снижает скорость сообщения подвижного состава. Но выполнение больших превышений наружного рельса сложно и неудобно в условиях городских улиц. При невозможности точного соблюдения расчетных скоростей движения трамваев и понижении скорости по сравнению с расчетной перегрузка внутреннего рельса может принести пути больше вреда, чем перегрузка наружного рельса при недостаточном возвышении. На выбор величины превышения влияет не только центробежная сила, но и ряд других силовых факторов, учет которых сложен и не всегда возможен: конструктивные особенности трамвая, реализация трамваем в кривой сил тяги, смазка боковых поверхностей головок рельсов, переменная сила ветра и др. Поэтому выбор превышения наружной рельсовой нити в кривой является многофакторной задачей. На практике на участках трамвайного пути со сложным профилем, когда возможны случаи входа в кривые с большой скоростью, приводящие к сходу с рельсов и даже к опрокидыванию трамвая, превышение наружного рельса принимают 25–150 мм.

Расстояние (строение) в свету C между трамваями, идущими одновременно по соседним путям, не должно быть меньше аналогичного расстояния на прямом участке пути. Так как в кривой это расстояние уменьшается, потому что концы вагонов смещаются наружу, а середина – внутрь (рис. 2.27, *а*), а на кривых, в которых возвышение упорной нити наружного пути $h_{0-н}$ больше возвышения упорной нити внутреннего пути $h_{0-вн}$, это невыгодное положение вагонов еще больше уменьшает расстояние C (рис. 2.27, *б*), что требует увеличения междупутного расстояния.

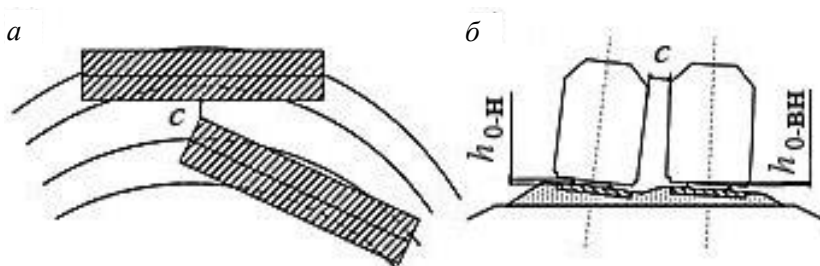


Рис. 2.27. Невыгодное положение вагонов в кривой:
а – в плане; *б* – в профиле ($h_{0-н} > h_{0-вн}$)

В связи с этим по требованию габарита приближения строения (расстояния) C возвышение наружного рельса внутреннего пути $h_{0-вн}$ должно быть не менее $0,5h_{0-н}$.

Следовательно, увеличение междупутных расстояний производят для обеспечения безопасности движения в момент одновременного прохода по кривой трамваев разного направления.

Основные требования и расчетные формулы. По рельсовым путям проходят поезда разного назначения (пассажирские, грузовые, специальные и т. п.) с разными скоростями движения, массой, силовым воздействием на путь. Поэтому, выполняя возвышение наружного рельса, учитывают требование: при движении пассажирского поезда по кривой непогашенное ускорение $a_{неп} \leq 0,7 \text{ м/с}^2$. Этот критерий является не только показателем комфортности движения для пассажиров, но и обеспечения безопасности движения поездов.

Величина возвышения наружного рельса, обеспечивающая соблюдение этого требования, определяется по формуле (2.7), которая для этого случая примет вид:

$$h = \frac{1600}{9,81} \frac{v_{\max}^2}{3,6^2 R} - \frac{1600}{9,81} 0,7 = 12,5 \frac{v_{\max}^2}{R} - 115 \leq 150, \text{ мм.} \quad (2.8)$$

Если обеспечить движение пассажирских поездов с максимальными скоростями, определенными по тяговым расчетам, не представляется возможным, то скорость определяется по формуле

$$v_{\max} = 0,283 \sqrt{R(h+115)}.$$

При этом повторяются тяговые расчеты, оценивается потеря времени хода и определяется возможность его компенсации за счет резервов графика на движение по участку.

При движении по кривой автомобили и автопоезда занимают более широкую полосу проезжей части, чем на прямом участке. Увеличение колеи на кривой в плане ($l = b_1 - b$) вызывает необходимость *уширения проезжей части*. Нормы уширения для двухполосных проезжих частей дороги принимают по СНиП 2.05.02-85. Уширение выполняют за счет внутренней обочины, после чего она должна быть не менее 1,5 м для дорог I и II категории и не менее 1,0 м для остальных категорий. Если это условие не выполняется, то необходимо уширить земляное полотно с внутренней стороны кривой.

Определение величины радиусов кривых в плане из условия обеспечения видимости в ночное время. Ранее было показано, что радиус кривой в плане зависит от расчетной скорости движения

и определяется по формуле $R = \frac{v^2}{127(\mu \pm i)}$. В СНиП 2.05.02-85 уста-

новлены минимальные радиусы кривых в плане в зависимости от расчетной скорости и допустимого значения коэффициента поперечной силы μ .

Однако движение с расчетной скоростью по кривым с нормированными радиусами в ночное время не гарантирует безопасности движения, т. к. освещение дороги фарами оказывается меньше, чем

расстояние видимости. Расчетное значение видимости из условия движения ночью определяется по выражению

$$s = \frac{\pi\beta R}{180},$$

где β – угол поворота переходной кривой между касательной к концу переходной кривой и осью абсцисс.

R – радиус кривой.

Откуда $R = \frac{180s}{\pi\beta}$. Поскольку $\beta = 2\alpha$ (α – угол поворота пучка света фар), то

$$R = 28,65 \frac{s}{\alpha}.$$

Для современных фар можно принять $\alpha \approx 2^\circ$. Тогда при $s_{\text{треб}} = 100\text{--}300$ м получаем минимальные радиусы по безопасности движения в ночное время в пределах 1500–4500 м. Эти значения больше рекомендованных минимальных в СНиП, поэтому в благоприятных условиях следует назначать возможно большие радиусы, не менее 3000 м.

Видимость в плане. Движение автомобилей с расчетной скоростью должно быть безопасным. Поэтому при проектировании дорог стремятся обеспечить видимость дороги на расстояние, достаточное для принятия мер против наезда или столкновения. Различают видимость при обгоне и видимость встречного автомобиля.

Видимость при обгоне – расстояние видимости, которое необходимо водителю, чтобы обеспечить обгон другого транспортного средства, не мешая при этом встречному транспортному средству двигаться с расчетной скоростью и не вынуждая его снижать скорость. *Видимость встречного автомобиля* – наименьшее расстояние видимости встречного автомобиля, которое меньше видимости при обгоне и обеспечивает безопасное прерывание обгона при быстром приближении встречного автомобиля.

Определение расчетного расстояния видимости. Расчетное расстояние видимости определяют по четырем схемам:

– остановка автомобиля перед препятствием;

– торможение двух автомобилей, движущихся навстречу друг другу;

– обгон автомобиля, движущегося с малой скоростью;

– боковая видимость.

По первой схеме расстояние видимости поверхности дороги S_1 :

$$S_1 = \frac{v_p t_p}{3,6} + \frac{k_3 v_p^2}{254(\varphi_1 - i)} + l_{3б}, \text{ м,}$$

где v_p – расчетная скорость движения автомобиля для дороги рассматриваемой категории (табл. 2.16);

t_p – время реакции водителя и включения тормозов, $t_p = 2,6$ с;

k_3 – коэффициент, учитывающий эффективность действия тормозов, $k_3 = 1,85$;

φ_1 – коэффициент продольного сцепления $\varphi_1 = 0,4-0,5$;

i – продольный уклон участка дороги, равный максимально допустимому для рассматриваемой категории дороги (табл. 2.16);

$l_{3б}$ – расстояние безопасности между автомобилем и препятствием, $l_{3б} = 5$ м.

Таблица 2.16

Зависимость скорости движения и уклонов от категории дороги

Категория дороги	I-a	I-б, I-в, II	III	IV	V
Расчетная скорость (основная)	140	120	100	80	60
$R_{\text{вып. min}}$, м	25 000	15 000	8000	4000	1500
$R_{\text{вог. min}}$, м	8000	6000	4000	2500	1500
Уклон i_{max} , %	40	40	50	60	70

По второй схеме расчетное расстояние видимости встречного транспорта:

$$S_2 = \frac{v_p}{1,8} + \frac{k_3 \varphi_1 v_p^2}{127(\varphi_1^2 - i^2)} + l_{3б}, \text{ м.}$$

По схеме обгона расчетное расстояние видимости вычисляют по формуле

$$S_3 = \frac{v_1^2}{1,8(v_1 - v_2)} + \frac{k_3 v_1 (v_1 + v_2)}{127 \varphi_1} + \left(\frac{k_3 v_2}{254 \varphi_1} + l_{3б} \right) \frac{2v_1}{(v_1 - v_2)}, \text{ м,}$$

где v_1 и v_2 – скорости движения обгоняющего и обгоняемого автомобилей соответственно, км/ч.

Обгоняемый автомобиль движется со скоростью не выше 90 км/ч на дорогах I-б, I-в, II и III категорий и не выше расчетной на дорогах IV, V категорий.

В городских условиях и на пересечениях с автомобильными и железными дорогами в одном уровне необходимо обеспечивать боковую видимость придорожной полосы. Водитель должен заблаговременно увидеть пешехода и принять соответствующие меры. Минимальное необходимое расстояние боковой видимости можно получить по геометрическим представлениям (рис. 2.28):

$$s_{бок} = \frac{2v_{п}}{v_p} S_1, \text{ м,}$$

где v_p – расчетная скорость автомобиля, км/ч;

$v_{п}$ – скорость движущегося пешехода (для бегущего человека $v_{п} = 10$ км/ч);

S_1 – расчетное расстояние видимости по первой схеме.

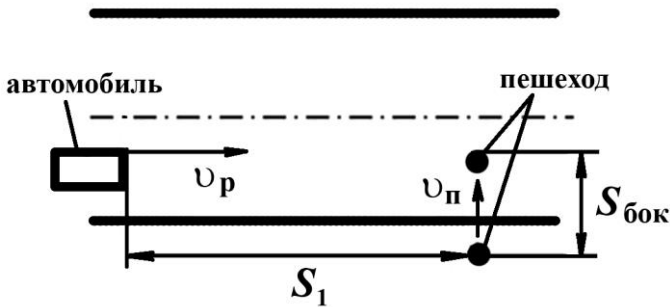


Рис. 2.28. Расчетная схема

По нормам расчетное расстояние видимости поверхности дороги равно 350, 250, 160, 100 и 60 м для скоростей 140, 120, 100, 80 и 60 км/ч соответственно.

Расчетное расстояние по второй схеме не нормируется.

Боковая видимость для дорог I и II категорий – 25 м, для III и IV – 15 м.

Полученные значения расстояний видимости S_1 и S_2 сравниваются с нормами, а для дальнейших расчетов принимаются большие значения.

Обеспечение видимости на кривых в плане. Видимость на кривой в плане определяют для автомобиля, следующего по крайней внутренней полосе движения. Для этого используют графический метод для определения границы срезки видимости.

Закругления дороги вычерчивают в крупном масштабе и по траектории автомобиля намечают ряд точек, от которых по кратчайшему направлению откладывают требуемое расстояние видимости. Кривая, огибающая полученные отрезки, и определяет границу срезки (рис. 2.29).

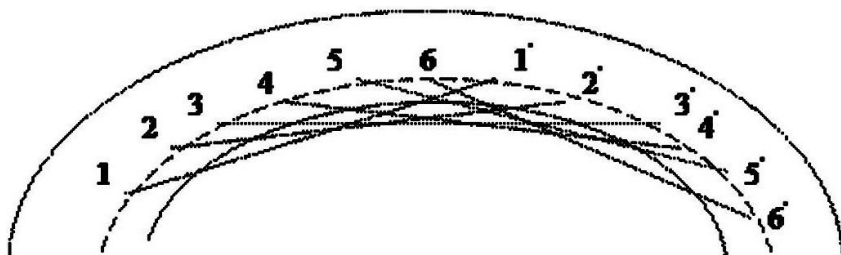


Рис. 2.29. Определение боковой видимости

Если срезка намечается в выемке, то учитывают возможное зарастание придорожной полосы травой или высоту снежного покрова. Поэтому низ срезки располагают ниже уровня глаза водителя как минимум на 0,3–0,5 м.

Величину срезки z можно получить аналитически (без построения плана). В этом случае надо учитывать соотношение между длиной кривой и требуемым расстоянием видимости.

Длина расчетной видимости S меньше кривой K ($S < K$). Длина расчетной видимости S меньше кривой K ($S < K$). Так как извест-

ны R и S , находим угол $\beta = 57,3^\circ S / R$. Тогда $z = R - R \cos \beta / 2 = R(1 - \cos \beta / 2)$, рис. 2.30.

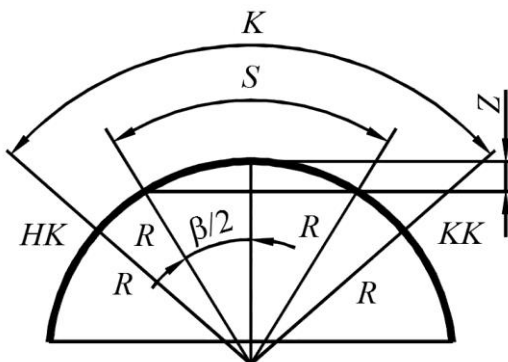


Рис. 2.30. Расчет боковой видимости при $S < K$

Длина расчетной видимости S больше кривой K ($S > K$). Здесь

$$h_1 = R(1 - \cos \alpha / 2);$$

$$h_2 = [(s - K) / 2] \sin \alpha / 2;$$

$$z = h_1 + h_2.$$

Тогда $z = [(s - K) / 2] \sin \alpha / 2 + R(1 - \cos \alpha / 2)$, рис. 2.31.

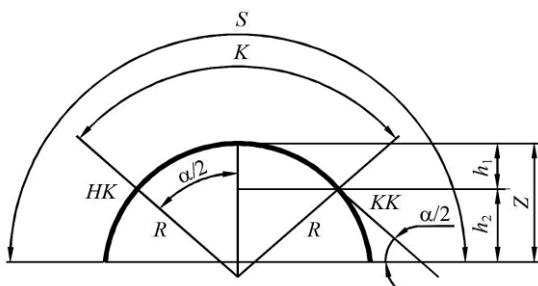


Рис. 2.31. Расчет боковой видимости при $S > K$

Таким образом, рассмотрены назначение переходных кривых для автомобильных дорог и трамвайных путей, требования, предъявля-

емые к ним. Представленные зависимости позволяют определить скорость движения подвижного состава как на прямолинейном, так и на криволинейном участке дороги или рельсового пути. Дан порядок расчета длины переходных кривых. При этом учитываются результаты расчета видимости дороги или рельсового пути в зависимости от радиуса криволинейного участка.

Контрольные вопросы

1. Назовите классификацию городских улиц и дорог.
2. Что понимается под скоростными дорогами?
3. Что понимается под магистральными улицами и дорогами?
4. Что понимается под улицами и дорогами местного значения?
5. Назовите основные элементы городских дорог.
6. Требования к городским улицам и дорогам.
7. Требования к дорожному покрытию.
8. Назовите материалы, применяемые для дорожных покрытий.
9. Что понимается под рельефом и профилем дороги?
10. Что понимается под возмущением дороги?
11. Назовите составляющие профиля дороги.
12. Что понимается под макропрофилем, микропрофилем и шероховатостью?
13. Назовите преимущества использования в качестве возмущения микропрофиля.
14. Напишите формулу, описывающую в простейшем случае дорожную неровность.
15. Какие дорожные покрытия относят к малоизношенным, сильно изношенным и разбитым?
16. В чем заключается назначение рельсового пути и ходовой части трамвая?
17. Назовите основные причины возникновения неровностей рельсового пути.
18. На какие две группы делятся все элементы рельсового пути и что к ним относится?
19. Назовите причины, в результате которых в верхнем строении пути накапливаются остаточные деформации?
20. Назовите основную динамическую характеристику верхнего строения пути?

21. Как определяются вертикальная и горизонтальная жесткости рельсового пути?

22. Из каких сил инерции складывается сила инерции рельсового пути?

23. Что понимается под приведенной массой рельсового пути?

24. Что должны обеспечивать рельсы?

25. Чем оценивается вертикальный износ головки рельсов?

26. Что обозначает цифра в маркировке рельсов?

27. Почему у рельсов, уложенных на криволинейных участках пути, наблюдается боковой износ головки?

28. Что создает волнообразность продольного профиля рельса?

29. Почему при укладке рельсов их головки наклоняют внутрь колеи?

30. Что такое подуклонка рельса?

31. Назовите назначение шпал и их основную характеристику?

32. Сколько примерно шпал укладывают на один километр рельсового пути?

33. Из каких деталей состоит стыковое крепление?

34. В результате чего образуется ступенька между поверхностями качения стыкуемых рельсов?

35. Что такое угол удара? Назовите его возможную величину.

36. Почему концы рельсов изнашиваются быстрее, чем рельс в среднем сечении?

37. Почему возникает стыковая неровность рельсовой нити?

38. Для чего предназначено промежуточное крепление?

39. Чем отличается нераздельное крепление от раздельного?

40. Для чего предназначен балластный слой?

41. Почему при действии одинаковой нагрузки на колесо про- садка рельсов в разных точках пути неодинакова?

42. Какая неровность называется силовой, а какая геометрической?

43. Назовите назначение основной площадки земляного полотна.

44. Что такое неравномерное пучение рельсового пути и почему оно возникает?

45. Назовите основные особенности закономерных и незаконномерных неровностей продольного профиля рельсового пути.

46. Напишите формулы, аппроксимирующие неровности рельсового пути.

47. Что понимается под термином «перекося»?

48. Из каких элементов состоит стрелочный перевод?

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

3.1. Общие сведения о системе электроснабжения

Электрическая энергия для всех потребителей (промышленности, населения города, транспорта и др.) вырабатывается на электрической станции в виде переменного трехфазного тока с частотой 50 Гц (рис. 3.1).

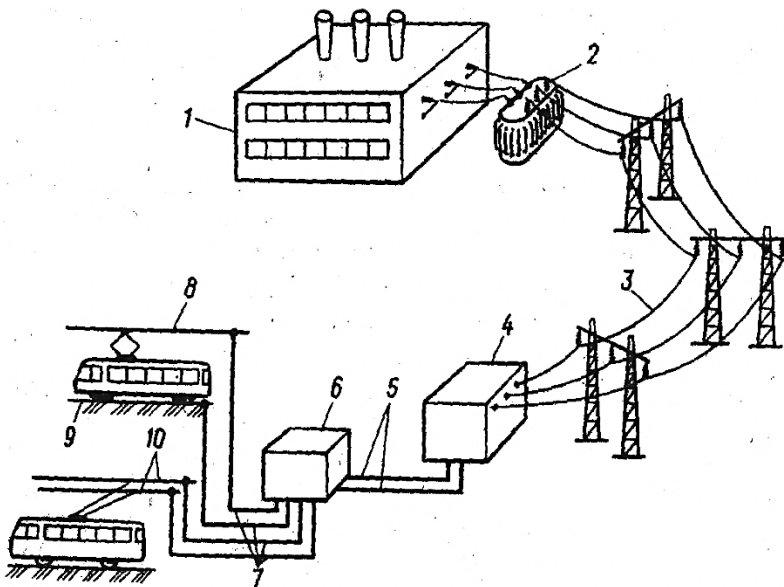


Рис. 3.1. Схема электроснабжения подвижного состава городского электрического транспорта:

1 - электрическая станция; 2 - понижающая трансформаторная подстанция; 3 - линия электропередачи; 4 - понижающая подстанция; 5 - кабельная линия 6 или 10 кВ; 6 - тяговая подстанция; 7 - питающие кабельные линии; 8 - контактный провод трамвая; 9 - рельсы; 10 - контактные провода троллейбуса

Выработанная энергия передается от электростанции к потребителям по линии электропередачи (ЛЭП) 3. Для уменьшения потерь энергии в ЛЭП напряжение повышается на трансформаторной подстанции 2 до уровня 35; 110; 220 кВ и более в зависимости

от расстояния до потребителей. Вблизи от места потребления на понижающей подстанции 4 уровень напряжения снижается до 6 или 10 кВ. От понижающей подстанции электроэнергия направляется потребителям. Питание тяговых подстанций 6 городского электротранспорта осуществляется по кабельным (реже – воздушным) трехфазным линиям 5.

На тяговой подстанции 6 напряжение понижается до 600 В и переменный ток преобразуется выпрямителями в постоянный. По питающим линиям положительной и отрицательной полярности 7 электроэнергия подается в контактные провода 8 трамвая 9 или контактные провода 10 троллейбуса. Подвижной состав трамваев и троллейбусов получает электроэнергию через контакт их токоприемников с контактным проводом, в трамвае второй контакт осуществляется через колесные пары и рельсы. Номинальное напряжение на контактном проводе составляет 550 В.

Контактной сетью называется совокупность всех устройств, включающая в себя контактную подвеску, поддерживающие ее опоры и конструкции, усиливающие провода, тросовую систему, арматуру и специальные части, служащие для подведения электрической энергии к подвижному составу через непосредственный контакт с его токоприемником.

3.2. Схемы внешнего и внутреннего электроснабжения

В современных условиях тяговые подстанции получают энергию не от одной электрической станции, а от энергетической системы, объединяющей несколько электростанций линиями электропередачи. Тяговые подстанции для подвижного состава находятся в городе и электроснабжение получают, как правило, от подстанций, распределительных пунктов (РП) или центров питания (ЦП) электрических систем.

При рассмотрении схемы электроснабжения выделяют две части:

– внешнее электроснабжение, включающее в себя все устройства от центра питания до тяговой подстанции вместе с кабельными (воздушными) линиями;

– внутреннее электроснабжение, включающее в себя тяговые подстанции и все элементы тяговой сети; контактную и рельсовую сеть, питающие линии.

Контактная сеть делится на электрически изолированные друг от друга участки, называемые *секциями контактной сети*. Секции отделяются на границах *секционными изоляторами*. Каждой секции присваивается номер или название. Внутри секции могут быть секционные изоляторы, которые называются *промежуточными* и служат для оперативных переключений при перераспределении нагрузки. В нормальном режиме работы они шунтируются электрическими перемычками.

Внутреннее электроснабжение выполняется в виде централизованного (рис 3.2, *а*) или децентрализованного (рис. 3.2, *б*) питания контактной сети. Централизованную схему применяют при подстанциях, имеющих большую мощность, позволяющую питать весь примыкающий к ней район контактной сети, которая состоит из секций, расположенных в разном удалении от подстанции.

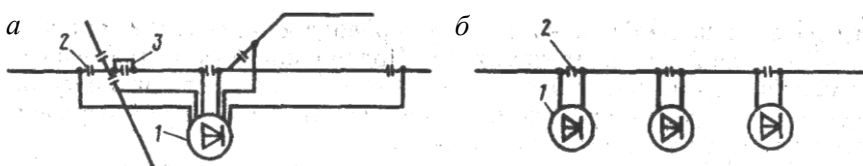


Рис. 3.2. Схемы внутреннего электроснабжения:

а – централизованное питание; *б* – децентрализованное питание; 1 – выпрямительная подстанция; 2 – секционный изолятор; 3 – электрический соединитель

При децентрализованной схеме секции питаются от 1–2 соседних подстанций или каждая подстанция питает примыкающую половину секции. При выходе из строя одной из подстанций ее нагрузка передается на соседнюю подстанцию. Каждая подстанция должна иметь соответствующий резерв мощности.

Выбирая ту или иную систему электроснабжения, предпочтение отдается той, которая обладает высоким уровнем надежности и обеспечивает гибкость управления. Под *надежностью* понимается безотказность, долговечность и ремонтпригодность, т. е. возможность непрерывно и длительно сохранять работоспособность в определенных режимах и быть приспособленной к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей в процессе технического обслуживания и проведения ремонтов. *Ремонтпригодность* характеризует затраты времени, труда и средств на техническое об-

служивание и ремонт оборудования, эффективность его использования в процессе эксплуатации.

Основы надежности всякой системы или инженерного сооружения закладываются при их проектировании с обеспечением определенных запасов прочности, необходимых резервных устройств в виде дублирующих элементов или увеличением запасов мощности основных элементов, которые используются при выходе из строя отдельных элементов системы. Вместе с тем система электроснабжения должна быть экономичной, что требует исключения чрезмерных затрат на дополнительное оборудование и устройства для создания резервов. Решение этого противоречия находят из сопоставления технико-экономических показателей возможных вариантов, принимая систему, обеспечивающую должную надежность при минимально возможных затратах. В эксплуатации имеют место разные условия работы системы электроснабжения: нормальный, вынужденный и аварийный режимы работы.

При *нормальном режиме* все элементы системы работают с наиболее высокими технико-экономическими показателями, обеспечивая питание подвижного состава в расчетных объемах, определенных для наиболее загруженного часа и при наиболее тяжелых условиях движения.

Вынужденный режим наступает, когда выходит из строя один из основных элементов системы: тяговая подстанция, преобразовательный агрегат или питающая линия. Движение подвижного состава идет нормально при использовании дополнительных элементов оборудования, зарезервированных заранее. При этом допускаются нагрузки на элементах системы электроснабжения, предельные по нормам, и потери напряжения в тяговой сети. На этот период допускаются ухудшения экономических показателей работы.

Аварийный режим наступает при тяжелых повреждениях элементов системы электроснабжения, когда движение в расчетных размерах становится невозможным. В этом режиме движение либо сокращается, либо прекращается полностью.

3.3. Особенности работы тяговых сетей

Работа тяговых сетей отличается от работы других систем электроснабжения рядом существенных особенностей. Для трамвая и трол-

лейбуса в соответствии с ГОСТ 6962-75 установлено номинальное напряжение 550 В с допустимыми отклонениями на токоприемнике подвижного состава от 400 В до 700 В. Тяговые нагрузки постоянно изменяются в очень широких пределах по времени и месту приложения на контактной сети.

На всех видах подвижного состава городского электрического транспорта применяют электрическое торможение, так как оно позволяет повысить надежность тормозной системы и существенно снизить эксплуатационные расходы на ее обслуживание и ремонт, а также уменьшить энергонагруженность тормозных механизмов. Основная задача электрического торможения заключается в том, чтобы преобразовать кинетическую энергию, запасенную при разгоне подвижного состава, или потенциальную энергию при подтормаживании его на спуске в электрическую или тепловую энергию. Кроме того, наличие на подвижном составе механических тормозов всегда обеспечивает резервирование процесса торможения и применяется как дополнительное или экстренное торможение.

Контактная сеть, являясь наиболее ответственным элементом системы электроснабжения, по своему устройству не имеет резерва в виде дублирующих устройств, а обслуживание ее затруднено потоками транспорта и пешеходов, особенно в условиях интенсивного городского движения. Поэтому к ее устройству подходят очень внимательно, а монтаж и ремонтные работы выполняются с учетом того, что повреждение любого элемента может вывести из работы большой участок сети и дезорганизовать движение не только трамвая или троллейбуса, но и другого транспорта.

Отличительной особенностью работы рельсовой сети трамвая является малая изоляция рельсов от земли. Земля – хороший проводник электрического тока, поэтому часть тока, возвращающаяся на подстанцию, ответвляется в землю и проходит как по земле, так и по подземным металлическим сооружениям (трубам, каркасам подземных сооружений, оболочкам кабелей и др.). Токи утечки из рельс в землю называются *блуждающими токами* (рис. 3.3).

В местах выхода блуждающих токов с поверхности металлических сооружений происходит электрохимический процесс, сопровождающийся коррозией (разрушением) металла подземных сооружений. Роль электролита в этом процессе играют растворы солей, кислот и щелочей, имеющиеся в почве. Подсчитано, что ток, рав-

ный 1 А, в течение года может при определенных условиях разрушить до 34 кг свинца или более 9 кг стали.

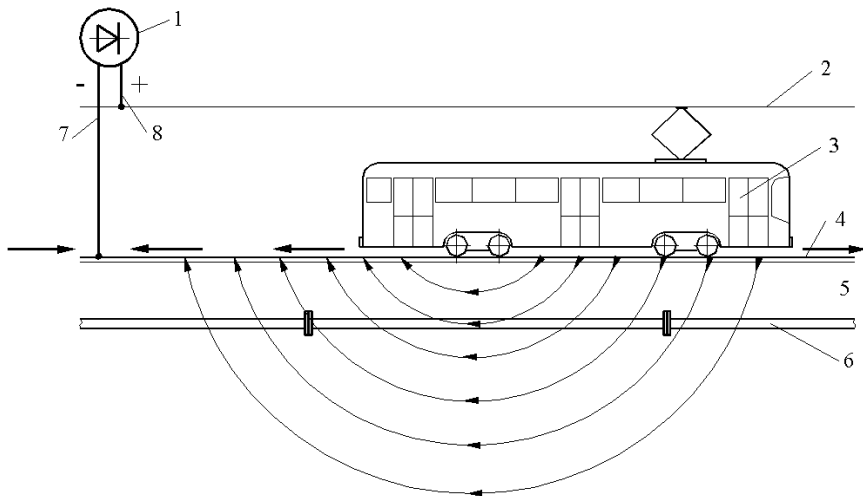


Рис. 3.3. Схема протекания блуждающих токов:

- 1 – подстанция; 2 – контактный провод; 3 – подвижной состав; 4 – рельсы;
5 – грунт; 6 – подземное сооружение; 7 – отрицательная питающая линия;
8 – положительная питающая линия

Чтобы снизить вредное воздействие блуждающих токов до безопасных значений, принимают ряд мер по ограничению их проникновения в подземные металлические сооружения. Главными мерами являются: уменьшение продольного сопротивления рельсов посредством сварки стыков и соединения медными проводами отдельных звеньев и всех нитей рельсов для параллельной работы, увеличение переходного сопротивления между рельсами и землей благодаря улучшению изоляции основания, применение хорошего водоотвода, уменьшение разности потенциалов между пунктами присоединения к рельсам кабелей питающих линий.

3.4. Контактные подвески

От вида контактных подвесок, конструкции и материалов проводов в большей мере зависит качество токосъема, потери электроэнергии и безопасность движения подвижного состава ГЭТ.

Подвешенный контактный провод можно рассматривать как натянутый трос, подвешенный в нескольких точках (рис. 3.4, а). Расстояние между опорными точками A и B называется *длиной пролета*, или *пролетом*. Под действием силы тяжести от собственной массы и других сил провод провисает по плавной кривой. Это провисание характеризуется *стрелой провеса* f , определенной как расстояние, измеренное по вертикали от точки подвешивания до нижней точки провода. Стрела провеса увеличивается с увеличением длины пролета и уменьшается с увеличением натяжения провода.

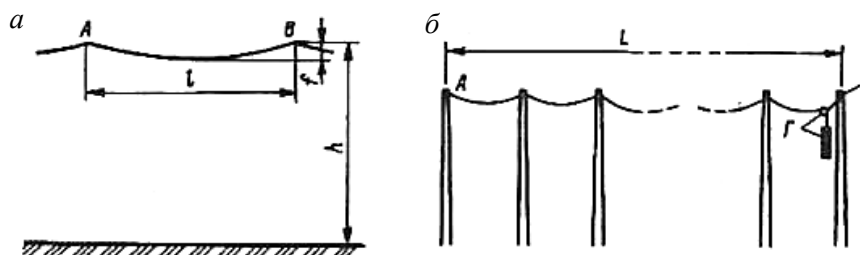


Рис. 3.4. Схемы подвешивания контактного провода:

- a – в пролете; b – с автоматическим регулированием натяжения;
- l – длина пролета; f – стрела провеса; h – высота подвески контактного провода;
- L – длина анкерного участка; A, B – опоры (точки подвешивания);
- Γ – грузовой компенсатор

Подвески, не имеющие автоматического регулирования, называются *некомпенсированными*; имеющие автоматическое регулирование грузовыми компенсаторами натяжения контактного провода и продольного троса – *компенсированными*; цепные подвески, имеющие автоматическое регулирование натяжения только контактного провода, – *полукомпенсированными*; а подвески с регулированием натяжения лишь в определенных пределах – *частично компенсированными*.

На прямых участках линий трамвая контактный провод располагают зигзагообразно с поочередными смещениями точек подвески вправо и влево от оси рельсового пути. Назначением зигзага является увеличение срока службы контактных вставок токоприемников трамваев за счет поперечного перемещения контактного провода по поверхности вставки во время движения.

Зигзаг характеризуется двумя величинами: смещением точки подвеса от оси пути и шагом. Для нормальной рельсовой колеи 1524 мм максимальный размер смещения принимается 250 мм. В эксплуатации за счет неточности регулировки при восстановлении мест повреждений, прогибов опор, вытяжки тросов допускается временное (до ближайшего профилактического ремонта) увеличение смещения отдельных точек до 350 мм.

Наибольший износ контактной вставки токоприемника трамвая происходит в ее средней части. Для более равномерного износа рабочей части контактной вставки применяют зигзаг со смещением контактного провода в одну сторону от оси пути. Средняя часть контактной вставки токоприемника трамвая подвергается износу на криволинейных участках пути и при проезде им специальных участков.

На криволинейном участке рельсового пути контактный провод располагается по хордам. Наибольшие допустимые отклонения (выносы) контактного провода от оси токоприемника трамвая должны быть не более 300 мм, а усилие на болт подвеса от излома оси провода – 2,5 кН. Для медного контактного провода предельно допустимые углы излома составляют 18° для провода сечением 65 мм², 14° – для провода сечением 85 мм² и 12° – для провода сечением 100 мм². Исходя из этих требований, длина хорды определяется в зависимости от радиуса криволинейного участка пути и марки применяемого провода.

Для противодействия центробежным силам, возникающим при движении трамвая на криволинейном участке пути, как отмечалось выше, наружный рельс возвышают над внутренним. Находясь на криволинейном участке пути, вагон получает наклон внутрь кривой, и середина токоприемника отклоняется от вертикали, проведенной через ось пути (рис. 3.5).

Отклонение токоприемника можно определить по формуле

$$C = \frac{hH}{154,2}, \text{ см}$$

где h – возвышение наружного рельса, см;

H – высота подвески провода, см;

152,4 – ширина колеи, см.

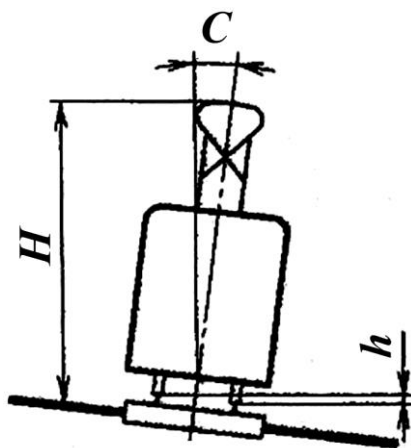


Рис. 3.5. Отклонение токоприемника трамвая на криволинейном участке рельсового пути

Над пересечением трамвайных путей под углом более 60° контактные провода располагаются по осям путей. Для прохода токоприемника снизу проводов монтируют конструкцию «воздушной крестовины». Над стрелочным переводом трамвайных путей контактные провода обоих путей фиксируют на общем подвесе. Для колеи шириной 1524 мм общий подвес должен находиться над серединой того места путей, где расстояние между сходящимися к путевой крестовине рельсами составляет 0,9–1,0 м.

Допустимая скорость движения подвижного состава при применении полукомпенсированных цепных подвесок составляет 80 км/ч, некомпенсированных цепных подвесок – до 60 км/ч. Остальные типы контактных подвесок допускают скорость подвижного состава до 45 км/ч.

3.5. Взаимодействие контактных подвесок и токоприемников подвижного состава

Процесс передачи электрической энергии от контактного провода подвижному составу называется *токо съемом*, он происходит в сложном механическом взаимодействии токоприемника и контактной подвески. *Токоприемником* называется аппарат, предназна-

ченный для создания электрического контакта электрооборудования подвижного состава с контактными проводами.

Надежный контакт может быть получен, когда сила нажатия токоприемника на контактный провод будет достаточна для получения необходимой поверхности контакта. Увеличение силы нажатия сверх необходимой вызывает повышенные износы контактного провода и контактирующей поверхности токоприемника – контактной вставки.

Процесс токосъема при скользящем контакте осложняется тем, что сама контактная подвеска перемещается под действием нажатия токоприемника. При этом изменяются расстояния между ее элементами.

По конструктивным особенностям токоприемники можно свести к следующим группам: штанговые, пантографы, асимметричные (полупантографы) и дуговые.

На троллейбусах применяются *штанговые токоприемники*. Для городов, имеющих только трамваи, оптимальными токоприемниками считаются *пантографы* для энергоемкого подвижного состава при больших скоростях движения и *дуговые токоприемники* для подвижного состава небольшой энергоемкости при малых и средних скоростях движения. В этих условиях получают наиболее простые и экономичные решения по устройству и эксплуатации контактной сети и токоприемников.

Существенную роль в токосъеме играет сила трения в подшипниках токоприемника. При подъеме токоприемника она уменьшает силу нажатия, а при опускании – увеличивает. Следовательно, на одной и той же высоте провода могут быть получены два разных нажатия: меньшее – при подъеме токоприемника, большее – при его опускании. Кривые, построенные для каждого типа токоприемника по значениям нажатия при подъеме и опускании, называются *статическими характеристиками токоприемника* (рис. 3.6).

Верхняя кривая 1 получена при опускании токоприемника, а нижняя 2 – при подъеме. Расстояние между верхней и нижней кривыми соответствует двойному значению силы трения.

При небольших скоростях движения подвижного состава влияние изменения высоты положения провода на нажатие токоприемника невелико и его можно считать приблизительно равным статическому нажатию. По мере увеличения скорости увеличивается

ускорение и сила инерции массы токоприемника, которая может достичь значений, соизмеримых со статическим нажатием, и решающим образом сказаться на токосъеме.

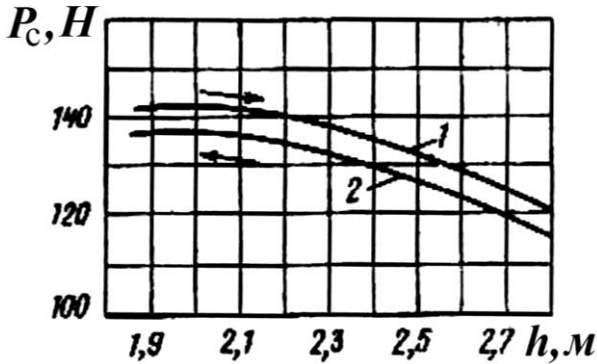


Рис. 3.6. Статические характеристики токоприемника

В общем виде *нажатие токоприемника на контактный провод* при движении подвижного состава определяется выражением:

$$F = F_{\text{пр}} \pm F_{\text{ш}} \pm F_{\text{д}} \pm F_{\text{в}},$$

где $F_{\text{пр}}$ – нажатие под действием пружин;

$F_{\text{ш}}$ – сопротивление трения в шарнирах токоприемника;

$F_{\text{д}}$ – динамическая вертикальная составляющая нажатия;

$F_{\text{в}}$ – аэродинамическая составляющая нажатия.

Результирующая сила от нажатия под действием пружин и сил сопротивления трения называется *статическим нажатием токоприемника*:

$$F_{\text{ст}} = F_{\text{пр}} \pm F_{\text{ш}}.$$

Для улучшения токосъема следует иметь постоянное статическое нажатие токоприемника в пределах рабочего диапазона высот контактного провода, что обеспечивается высокой точностью изготовления токоприемника, сборкой его подъемного механизма и уменьшением трения в шарнирах.

Нажатие на провод для токоприемника с двойной вставкой составляет (100 ± 5) Н, а с одинарной – (75 ± 5) Н.

Динамическая составляющая нажатия токоприемника на контактный провод рассчитывается по формуле

$$F_{\text{дин}} = m_{\text{T}} a,$$

где m_{T} – приведенная масса токоприемника;

a – ускорение приведенной массы токоприемника в вертикальном направлении.

Приведенной массой токоприемника называется масса, которая, будучи приложенной в точке контакта токоприемника с проводом, вызывает такое же воздействие на контактную подвеску, как и весь токоприемник. Уменьшение неравномерности нажатия от действия динамической составляющей достигается уменьшением приведенной массы, для чего используют облегченные конструкции из высокопрочной стали.

Направление динамической составляющей определяется направлением ускорения, которое на всем протяжении пролета сохраняет свой знак (рис. 3.7). На участках снижения и повышения траектории движения токоприемника разность скоростей v_2 и v_1 ; v_4 и v_3 (касательных к траектории) дает ускорение a , направленное вверх. Сила инерции действует в противоположном направлении, следовательно, уменьшается нажатие токоприемника.

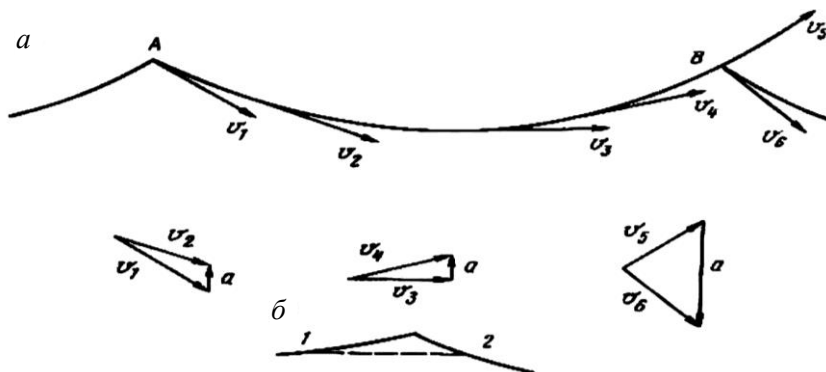


Рис. 3.7. Схема взаимодействия токоприемника с контактной сетью:
 a – при ускорении; b – при проходе точки подвешивания

В точке подвеса на очень небольшом участке перегиба провода разность скоростей v_5 и v_6 приводит к тому, что ускорение не только меняет свой знак, но и величину. Это вызывает явление, сходное с ударом. Сила удара зависит от угла перегиба провода.

Для обеспечения непрерывного контакта токоприемника с контактным проводом должно быть соблюдено следующее соотношение:

$$F = F_{\text{ст}} - F_{\text{в}} \geq F_{\text{мин}};$$

$$F_{\text{ст}} \geq F_{\text{мин}} + F_{\text{в}},$$

где $F_{\text{мин}}$ – минимальное нажатие токоприемника на провод, обеспечивающее надежный контакт.

В противном случае при $F_{\text{ст}} \leq F_{\text{мин}} + F_{\text{в}}$ токоприемник оторвется от провода, и контакт нарушится. Такое положение может возникнуть, например, при движении со скоростями, превышающими расчетные скорости движения подвижного состава или на участках с большими провесами проводов. На рис. 3.7, б показан момент прохода токоприемником точки подвешивания. Под действием силы инерции токоприемник не успевает следовать за изменением высоты провода, отрывается от него в точке 1 и снова приходит в соприкосновение с ним в точке 2.

В точке отрыва токоприемника при движении подвижного состава под током возникает электрическая дуга, поджигающая провод и вызывающая его перегрев. В точке 2 под действием удара происходит механический износ провода. При ударе вследствие упругой деформации возникают колебательные движения провода и токоприемника, а затем ряд последовательных затухающих ударов, увеличивающих зону подбоя провода.

1.6. Связь режимов работы подвижного состава и системы электроснабжения

Номинальное напряжение в контактной сети, при котором производят многие расчеты, связанные с движением подвижного состава, установлено стандартами: на токоприемнике подвижного состава напряжение должно быть 550 В. Однако при движении подвижного

состава напряжение в контактной сети колеблется относительно среднего значения.

На рис. 3.8 представлена схематизированная диаграмма изменения напряжения в контактной сети на некотором участке движения. Здесь 1 – контактный провод; 2 – подвижной состав; 3 – второй контактный провод или рельсы; A, B, C – тяговые подстанции; U_A, U_B, U_C – напряжения на тяговых подстанциях; U_0 – напряжение холостого хода подстанции; $I_1 \dots I_6$ – токи подвижного состава в режиме тяги; $I_{p1} \dots I_{p3}$ – то же в режиме рекуперации; $U_{p1} \dots U_{p3}$ – напряжение на подвижном составе, работающем в режиме рекуперации.

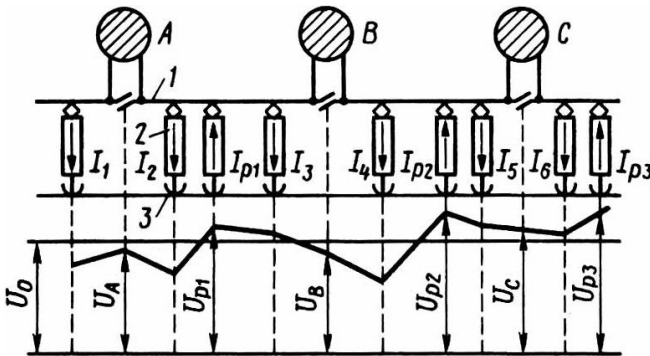


Рис. 3.8. Диаграмма изменения напряжения в контактной сети

Отклонение напряжения в контактной сети, сохраняющееся длительное время, вызывает пропорциональное изменение напряжения на тяговых электродвигателях и, следовательно, скорости движения подвижного состава. Например, при напряжении U_1 на токоприемнике и неизменном положении контроллера водителя, принимая установившимся режим работы подвижного состава, можно рассчитать скорость его движения:

$$v_1 = \frac{U_1 - Ir}{c_0 \Phi},$$

где I – ток тягового электродвигателя;
 r – сопротивление его обмоток;
 Φ – магнитный поток;
 c_0 – постоянный коэффициент.

При напряжении на токоприемнике U_2 и том же установившемся режиме скорость движения подвижного состава:

$$v_2 = \frac{U_2 - Ir}{c_0 \Phi}.$$

Так как в нормальных условиях работы тягового электродвигателя падение напряжения Ir в его обмотках обычно не превышает 3 % номинального напряжения, пренебрегая им и практически малой разницей в потерях энергии в подвижном составе при напряжениях U_1 и U_2 , получим:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Если $U_1 > U_2$, считают, что скорость движения подвижного состава возрастет пропорционально отношению напряжений.

Сравнительная диаграмма изменения скорости движения подвижного состава при напряжении $U_1 > U_2$ представлена на рис. 3.9, где t_{x1} и t_{x2} – время движения подвижного состава при напряжении соответственно U_1 (кривая 1), исключая пуск и выбег, и U_2 (кривая 2); t_1 и t_2 – общее время хода при напряжении соответственно U_1 и U_2 ; Δt – поправка на время хода подвижного состава, обусловленная разностью напряжений U_1 и U_2 .

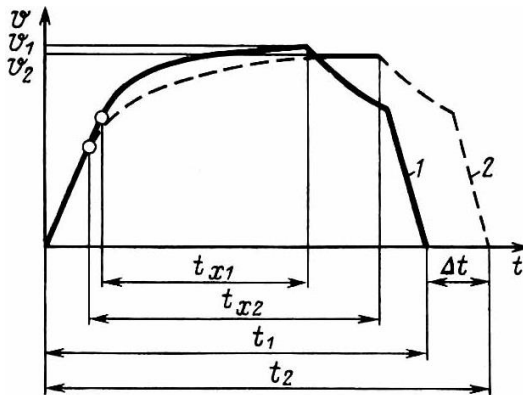


Рис. 3.9. Диаграмма изменения скорости движения подвижного состава при напряжении $U_1 > U_2$

Считается, что если изменение напряжения контактной сети вызывает пропорциональное изменение скорости движения, то время хода подвижного состава изменяется обратно пропорционально изменению напряжения, т. е. $t_2 = (U_1 / U_2)t_1$ и, следовательно, поправка на время хода подвижного состава $\Delta t = (U_1 / U_2 - 1)t_1$.

Напряжение в контактной сети не влияет на время разгона подвижного состава, его выбега и торможения. Поэтому поправку на время движения подвижного состава по перегону определяют только за время движения его на ходовых позициях контроллера водителя.

Изменения времени движения подвижного состава по перегону также влияют на условия его работы: меняется потребление тока, расход электроэнергии, нагрев тяговых электродвигателей, а также режим работы вспомогательных машин. При снижении скорости подвижного состава, следовательно, увеличении его времени хода, время потребления тока из контактной сети растет в значительно большей мере, чем снижается скорость движения. Это приводит к увеличению количества тепла, нагревающего обмотки тяговых электродвигателей. В результате возрастает опасность теплового разрушения обмоток тяговых электродвигателей.

Взаимное влияние режимов работы устройств электроснабжения и подвижного состава проявляется и во взаимодействии электромагнитных полей, возникающих при преобразовании электрической энергии на тяговых подстанциях и подвижном составе. Возникающие электромагнитные поля создают помехи не только оборудованию подвижного состава, но в большей степени устройствам связи, телемеханики и т. п. Это нарушение так называемой электромагнитной совместимости.

Контрольные вопросы

1. На что затрачивается энергия тяговых электродвигателей подвижного состава при его движении?
2. Что такое система электроснабжения, из каких элементов она состоит?
3. Из каких элементов состоит тяговая и контактная сети?
4. Что такое внешнее энергоснабжение?
5. Что определяют надежность, ремонтпригодность, нормальный, вынужденный и аварийный режимы?

6. Что такое зигзаг провода, для чего его делают и какими величинами он характеризуется?
7. Как располагается контактный провод на криволинейном участке рельсового пути?
8. Что понимается под статической характеристикой токоприемников?
9. Напишите формулу, определяющую в общем виде силу нажатия токоприемника на контактный провод.
10. Что называется приведенной массой токоприемника и как она влияет на токосъем?
11. Какие основные требования предъявляются к токоприемникам для обеспечения надежного контакта?
12. Какие основные требования предъявляются к контактной сети для обеспечения надежного контакта?
13. В чем проявляется взаимное влияние режимов работы устройств электроснабжения и подвижного состава?

Литература

1. Транспорт дорожный. Основные термины и определения. Классификация : ГОСТ 31286-2005.
2. Сооружения станционные пассажирские, автомобили, троллейбусы, трамваи. Основные требования к информационному оформлению : СТБ 1389-2003.
3. Искусственные неровности на автомобильных дорогах и улицах. Технические требования и правила применения : СТБ 1538-2005.
4. Богдан, Н. В. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов, А. И. Сафонов; под ред. Н. В. Богдана. – Минск : Ураджай, 1999. – 345 с.
5. Богдан, Н. В. Конструкции подвижного состава. Трамвай : учебное пособие / Н. В. Богдан [и др.]; под ред. В. П. Бойкова. – Минск : БНТУ, 2008. – 366 с.
6. Ефремов, И. С. Технические средства городского электрического транспорта : учебное пособие / И. С. Ефремов, И. М. Кобозев, В. В. Шевченко. – М. : Высшая школа, 1985. – 448 с.
7. Беляев, И. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети / И. А. Беляев, В. А. Вологин. – М. : Транспорт, 1983. – 191 с.
8. Афанасьев, А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса : учебник / А. С. Афанасьев. – М. : Транспорт, 1988. – 264 с.
9. Пономарев, А. А. Подвижной состав и сооружения городского электротранспорта : учебник для техникумов / А. А. Пономарев, Б. К. Иеропольский. – М. : Транспорт, 1981. – 274 с.
10. О комплексной программе развития электротранспорта на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 9 апреля 2021 г., № 213 // Нац. реестр правовых актов РБ. – 2021. – 5/48972.

Алфавитный указатель

База двухосного одиночного троллейбуса.....	47
База тележки	48
База четырехосного трамвая.....	48
Блуждающие токи	145
Вертикальный износ головок рельсов.....	102
Вместимость ПС.....	48
Высота трамваев.....	46
Высота троллейбусов.....	46
Габаритная площадь.....	48
Горизонтальная жесткость рельсового пути.....	100
Городской электрический транспорт	34
Динамическая комфортабельность.....	62
Длина пролета.....	147
Жесткости рамного рельса и остряка	111
Жесткость рельсового пути	98
Искусственная неровность	88
Комфортабельность.....	62
Контактная сеть	142, 145
Кэффициент постели.....	108
Магистральные улицы и дороги	79
Макропрофиль	84
Маневренность	32
Микропрофиль.....	84
Надежность	143
Наибольшая длина ПС.....	44
Остаточные деформации рельсового пути.....	98
Плавность хода	32
Подвижной состав электрического транспорта.....	5
Подуклонка рельса	103
Полезная площадь ПС.....	48
Полная масса.....	41
Полная ширина ПС.....	46
Потенциальные свойства	31
Приведенная масса токоприемника.....	152
Профиль дороги.....	84
Проезжимость.....	32

Режимы работы системы электроснабжения.....	144
Ремонтопригодность	143
Сварной стык	105
Свойства надежности.....	31
Секции контактной сети	142
Скоростные дороги	79
Скорость движения транспорта	57
Снаряженная масса.....	41
Сочлененный трамвай.....	7
Сочлененный троллейбус	6
Статическая комфортабельность	62
Статическое нажатие токоприемника	151
Стрела провеса.....	147
Теория электрического и автономного транспорта	5
Технико-экономические показатели подвижного состава	6
Трамвай	7
Трамвайный поезд.....	7
Троллейбус.....	6
Угол удара.....	104, 105
Удельный расход.....	55
Улицы и дороги местного назначения	79
Управляемость.....	32
Условная (приведенная) масса рельсового пути	100
Устойчивость	32
Функциональные свойства	31
Шероховатость	84
Ширина колеи.....	98
Электробус	6
Электромобиль	6

ПРИЛОЖЕНИЕ

Электробусы ВКМ HOLDING

В настоящее время ВКМ HOLDING (г. Минск, Беларусь) производит электробусы серий OLGGERD и VITOVТ.

Серия OLGGERD

Это новое поколение электробусов, которое пришло на смену серии SYABAR. В октябре 2019 года в рамках Форума регионов Республики Беларусь и Украины ВКМ HOLDING представил 12-метровый электробус серии OLGGERD.

Кузовы моделей серии OLGGERD могут быть изготовлены как из конструкционной, так и из нержавеющей стали. Также электробус может быть изготовлен как с обычной (классической) реализацией привода с использованием отдельно установленного тягового электродвигателя, так и с использованием электропортальных мостов различных производителей.

Кабина водителя разработана и изготовлена согласно европейским стандартам качества:

- пульт водителя закреплен на рулевой колонке с возможностью регулировки вместе с ней, не закрывается рулевым колесом;
- применен мультируль: кнопки с наиболее часто используемыми функциями вынесены на рулевое колесо;
- установлены удобные для водителя подрулевые переключатели.

В модификации с задним отсеком для установки батарей электробус может вмещать 30 мест для сидения и при этом иметь просторную накопительную площадку с двумя местами для лиц приоритетной категории, что соответствует последним стандартам, действующим на территории Европейского союза. В модификации без заднего отсека количество мест для сидения возрастает до 35.

Общий вид электробуса серии OLGGERD представлен на рис. П1.



Рис. П1. Общий вид электробуса серии OLGERD

Характеристики автономного хода электробусов серии OLGERD приведены в табл. П1.

Таблица П1

Характеристики автономного хода электробусов
серии OLGERD

Характеристика автономного хода	Величина или тип
Зарядка при остатке 30 %, мин	8–180
Суточный пробег, км	300
Тип накопителя электроэнергии	суперконденсатор / Li-ion: NMC / LTO / LFP
Тип зарядки	ультра быстрая (пантограф) / ночная (розетка)
Срок службы накопителя, лет	10

Электробусы серии OLGERD изготавливаются трех моделей: E390, E321 и E333. Общие виды и характеристики этих электробусов представлены соответственно на рис. П2, П3 и П4 и табл. П2, П3 и П4.



Рис. П2. Общий вид электробуса модели E390

Таблица П2

Технические характеристики электробуса модели E390

Техническая характеристика	Величина
Длина, м	9,5
Пассажировместимость, чел.	80
Число мест для сидения	21
Снаряженная масса, кг	9540
Максимальная масса, кг	15 000

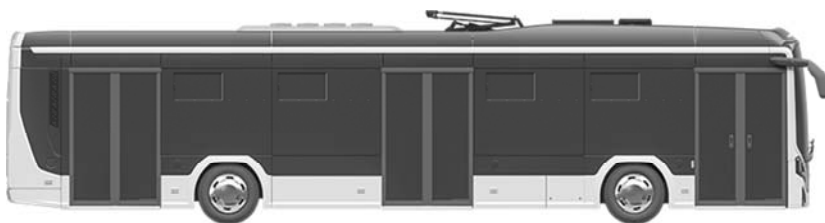


Рис. П3. Общий вид электробуса модели E321

Таблица П3

Технические характеристики электробуса модели E321

Техническая характеристика	Величина
Длина, м	12,5
Пассажировместимость, чел.	88
Число мест для сидения	30
Снаряженная масса, кг	12 080
Максимальная масса, кг	18 000



Рис. П4. Общий вид электробуса модели E333

Таблица П4

Технические характеристики электробуса модели E333

Техническая характеристика	Величина
Длина, м	18,75
Пассажировместимость, чел.	153
Число мест для сидения	45
Снаряженная масса, кг	17 550
Максимальная масса, кг	28 000

Серия VITOVT

Особенность электробусов серии VITOVT – увеличенная колесная база, которая позволяет добиться максимальной площади низкого пола с минимальным количеством возвышений и ступеней в салоне.

Компоновка с увеличенной базой и выносом передней оси в кабину водителя позволяет увеличить количество мест для сидения.

В зоне низкого пола сидения могут быть установлены по формуле 2+1, 1+1, что обеспечивает широкий проход между сидениями.

Общий вид и характеристики автономного хода электробуса серии VITOVT представлены на рис. П5 и табл. П5 соответственно.



Рис. П5. Общий вид электробуса серии VITOVT

Таблица П5

Характеристики автономного хода электробусов
серии VITOVT

Характеристика автономного хода	Значение или тип
Зарядка при остатке 30 %, мин	8–180
Суточный пробег, км	300
Тип накопителя электроэнергии	суперконденсатор / Li-ion: NMC / LTO / LFP
Тип зарядки	ультра быстрая (пантограф) / ночная (розетка)
Срок службы накопителя, лет	10

Электробусы серии VITOVT изготавливаются трех моделей: E490, E420 и E433. Общие виды и характеристики этих электробусов представлены соответственно на рис. П6, П7 и П8 и табл. П6, П7 и П8.

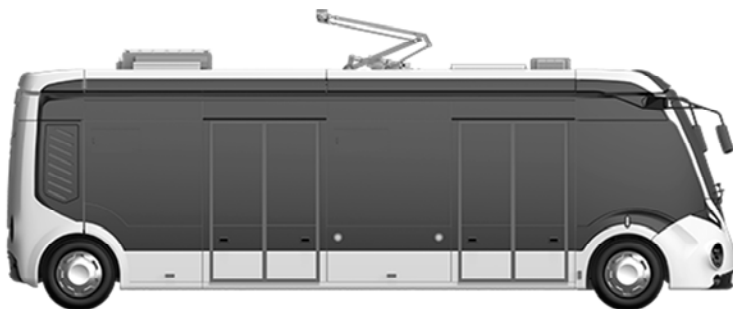


Рис. П6. Общий вид электробуса модели E490

Таблица П6

Технические характеристики электробуса модели E490

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	9,5
Пассажировместимость, чел.	80
Число мест для сидения	18
Снаряженная масса, кг	9540
Максимальная масса, кг	15 000

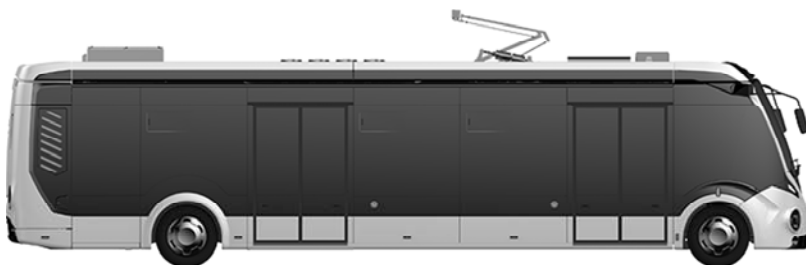


Рис. П7. Общий вид электробуса модели E420

Таблица П7

Технические характеристики электробуса модели E420

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	12,2
Пассажировместимость, чел.	86
Число мест для сидения	27
Снаряженная масса, кг	12 080
Максимальная масса, кг	18 000



Рис. П8. Общий вид электробуса модели E433

Таблица П8

Технические характеристики электробуса модели E433

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	18,75
Пассажировместимость, чел.	153
Число мест для сидения	38
Снаряженная масса, кг	17 550
Максимальная масса, кг	28 000

Троллейбусы ВКМ HOLDING

В настоящее время ВКМ HOLDING (г. Минск, Беларусь) производит троллейбусы серий OLGERD, VITOVT и SYABAR.

Серия OLGERD

Эта серия имеет новую усовершенствованную конструкцию кузова взамен предыдущего поколения серии SYABAR.

Троллейбусы OLGERD отличаются большей площадью низкого пола в пассажирском салоне, что позволяет комфортнее разместиться пассажирам.

Кузов троллейбусов OLGERD состоит из отдельных секций с унифицированными размерами. Все оконные и дверные проемы абсолютно одинаковы, что позволило провести унификацию стекол и других элементов конструкций.

Троллейбусы OLGERD могут быть оборудованы системой автономного хода на базе современных накопителей электроэнергии. Зарядка накопителей осуществляется в процессе движения под контактной троллейбусной сетью или от зарядной станции.

Имеется возможность в автоматическом режиме из кабины водителя снятия и установки токоприемников на контактную сеть.

Общий вид троллейбуса серии OLGERD представлен на рис. П9.



Рис. П9. Общий вид троллейбуса серии OLGERD

Троллейбусы серии OLGED изготавливаются двух моделей: 321 и 333. Общие виды и характеристики этих троллейбусов представлены соответственно на рис. П10 и П11 и табл. П9 и П10.

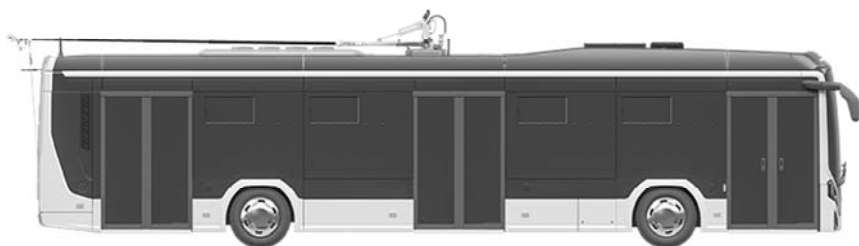


Рис. П10. Общий вид троллейбуса модели 321

Таблица П9

Технические характеристики троллейбуса модели 321

Автономный ход	Техническая характеристика	Значение
	Длина, м	12,5
	Максимальная масса, кг	18 000
	Мощность электродвигателя, кВт	150
До 1 км	Пассажировместимость, чел.	105
	Число мест для сидения	35
	Снаряженная масса, кг	10 850
До 20 км	Пассажировместимость, чел.	99
	Число мест для сидения	30
	Снаряженная масса, кг	11 250
	Зарядка при остатке 30 %, мин	8–40
	Срок службы накопителя, лет	10



Рис. П11. Общий вид троллейбуса модели 333

Технические характеристики троллейбуса модели 333

Автономный ход	Техническая характеристика	Значение
	Длина, м	18,75
	Максимальная масса, кг	28 000
	Мощность электродвигателя, кВт	180
До 1 км	Пассажировместимость, чел.	170
	Число мест для сидения	45
	Снаряженная масса, кг	16 400
До 20 км	Пассажировместимость, чел.	164
	Число мест для сидения	45
	Снаряженная масса, кг	16 800
	Зарядка при остатке 30 %, мин	8–40
	Срок службы накопителя, лет	10

Серия VITOVT

Особенность троллейбусов VITOVT – увеличенная колесная база, которая позволяет добиться максимальной площади низкого пола с минимальным количеством возвышений и ступеней в салоне.

Весь модельный ряд троллейбусов VITOVT может быть оснащен современными накопителями электроэнергии, которые обеспечивают увеличенный автономный ход и позволяют эксплуатировать троллейбус на участках маршрута без контактной сети.

Троллейбус может быть оборудован системой дистанционного (из кабины водителя) опускания и установки токоприемников на контактную сеть.

Общий вид троллейбуса серии VITOVT представлен на рис. П12.



Рис. П12. Общий вид троллейбуса серии VITOVT

Троллейбусы серии VITOVT изготавливаются двух моделей: 420 и 433. Общие виды и характеристики этих троллейбусов представлены соответственно на рис. П13 и П14 и табл. П11 и П12.



Рис. П13. Общий вид троллейбуса модели 420

Таблица П11

Технические характеристики троллейбуса модели 420

Автономный ход	Техническая характеристика	Значение
	Длина, м	12,25
	Максимальная масса, кг	18 000
	Мощность электродвигателя, кВт	150
До 1 км	Пассажировместимость, чел.	103
	Число мест для сидения	27
	Снаряженная масса, кг	10 950
До 20 км	Пассажировместимость, чел.	98
	Число мест для сидения	27
	Снаряженная масса, кг	11 350
	Зарядка при остатке 30 %, мин	8–40
	Срок службы накопителя, лет	10



Рис. П14. Общий вид троллейбуса модели 433

Таблица П12

Технические характеристики троллейбуса модели 433

Автономный ход	Техническая характеристика	Значение
	Длина, м	18,75
	Максимальная масса, кг	28 000
	Мощность электродвигателя, кВт	180
До 1 км	Пассажировместимость, чел.	165
	Число мест для сидения	43
	Снаряженная масса, кг	16 750
До 20 км	Пассажировместимость, чел.	159
	Число мест для сидения	38
	Снаряженная масса, кг	17 150
	Зарядка при остатке 30 %, мин	8–40
	Срок службы накопителя, лет	10

Серия SYABAR

Троллейбус серии SYABAR – самый популярный в странах СНГ низкопольный троллейбус ВКМ HOLDING.

В 2016 году произошел рестайлинг серии SYABAR – по выбору заказчика появилась возможность установить один из вариантов наружной светотехники: на базе точечных светильников либо блок-фар. Могут быть установлены как LED-светильники, так и точечные светильники с лампами накаливания.

Троллейбусы SYABAR могут быть оборудованы системой автономного хода на базе современных накопителей электроэнергии. Зарядка накопителей осуществляется в процессе движения под контактной троллейбусной сетью или от зарядной станции.

Из кабины водителя в автоматическом режиме возможны снятие и установка токоприемников на контактную сеть.

Общий вид троллейбуса серии SYABAR представлен на рис. П15.



Рис. П15. Общий вид троллейбуса серии SYABAR

Троллейбусы серии SYABAR изготавливаются только модели 321. Общий вид и характеристика этой модели троллейбуса представлены на рис. П16 и табл. П13.

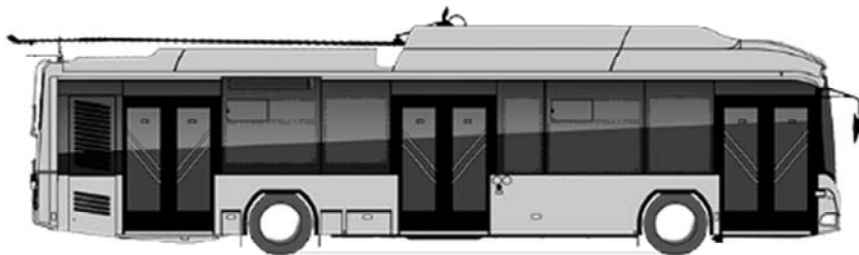


Рис. П16. Общий вид троллейбуса модели 321

Таблица П13

Технические характеристики троллейбуса модели 321

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	12,5
Пассажировместимость, чел.	101
Число мест для сидения	26
Снаряженная масса, кг	11 100
Максимальная масса, кг	18 000
Максимальная скорость, км/ч	60

Трамваи ВКМ HOLDING

Трамваи ВКМ HOLDING представляют собой семейство односекционных и многосекционных трамваев с переменным уровнем пола.

Вагоны спроектированы с высокой степенью комфортности для пассажиров: большая часть сидений расположена на «низком» полу, доступ к которым открыт без дополнительных ступеней на пути.

Несущий каркас трамваев изготовлен из стали с повышенной коррозионной стойкостью, что существенно увеличивает срок эксплуатации транспорта.

Все модели трамваев оборудованы системой автономного хода до 1 км на базе современных накопителей электроэнергии. Предусмотрена возможность увеличения автономного хода до 5 км.

Запас автономного хода позволяет трамвайному вагону осуществлять движение на новых маршрутах, не оборудованных подвесной контактной сетью, продлевать уже существующие маршруты, а также обеспечивает возможность движения при отключении электропитания в контактной сети.

Общий вид односекционных и многосекционных трамваев с переменным уровнем пола представлен на рис. П17 и П18 соответственно.



Рис. П17. Общий вид односекционного трамвая



Рис. П18. Общий вид многосекционного трамвая

Односекционные трамваи ВКМ HOLDING изготавливаются двух моделей: 802 и 811. Общие виды и характеристики этих трамваев представлены соответственно на рис. П19 и П20 и табл. П14 и П15.



Рис. П19. Общий вид трамвая модели 802

Таблица П14

Технические характеристики трамвая модели 802

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	15,6
Пассажировместимость, чел.	165
Число мест для сидения	28
Снаряженная масса, кг	19 300
Максимальная масса, кг	30 600
Мощность электродвигателя, кВт	50×4



Рис. П20. Общий вид трамвая модели 811

Таблица П15

Технические характеристики трамвая модели 811

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	16,3
Пассажировместимость, чел.	165
Число мест для сидения	33
Снаряженная масса, кг	19 800
Максимальная масса, кг	30 600
Мощность электродвигателя, кВт	50×4

Многосекционные трамваи ВКМ HOLDING изготавливаются двух моделей: 845 и 856. Общие виды и характеристики этих трамваев представлены соответственно на рис. П21 и П22 и табл. П16 и П17.



Рис. П21. Общий вид трамвая модели 845

Таблица П16

Технические характеристики трамвая модели 845

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	28,2
Пассажировместимость, чел.	343
Число мест для сидения	60
Снаряженная масса, кг	35 080
Максимальная масса, кг	58 500
Мощность электродвигателя, кВт	50×6



Рис. П22. Общий вид трамвая модели 856

Таблица П17

Технические характеристики трамвая модели 856

Техническая характеристика	Значение
Длина, м	33,2
Пассажировместимость, чел.	314
Число мест для сидения	66
Снаряженная масса, кг	38 750
Максимальная масса, кг	62 360
Мощность электродвигателя, кВт	50×8

Троллейбус ОАО «МАЗ»

В настоящее время ОАО «МАЗ» (г. Минск, Беларусь) производит троллейбус модели МАЗ 203Т. Данный троллейбус имеет низкопольную конструкцию и предназначен для перевозки пассажиров на городских маршрутах. Общий вид троллейбуса МАЗ 203Т представлен на рис. П23, его технические характеристики – в табл. П18.



Рис. П23. Общий вид троллейбуса МАЗ 203Т

Таблица П18

Технические характеристики троллейбуса МАЗ 203Т

Техническая характеристика	Значение или тип
Модель двигателя	ДТА1-У1, ДТА-3У1, ТАД-155-4БУ1
Мощность двигателя, кВт	180 кВт; 170 кВт; 155 кВт
Формула дверей	3×2
Тормозная система	пневматическая, двухконтурная, с разделением на контуры по осям
Система отопления	электрические отопители
Тяговый привод	преобразователь тяговый на IGBT транзисторах

Окончание табл. П18

Автономный ход	с аварийным автономным ходом до 2 км
Шины	бескамерные 275/70 R 22,5
Кол-во мест общее / для сидения	88-102/30-32
База, мм	5900
Подвеска передней / средней / задней оси	зависимая, пневматическая, двухбаллонная / зависимая, пневматическая, четырехбаллонная
Габаритные размеры	12 000×2550×3700
Технически допустимая масса, приходящаяся на переднюю ось, кг	6500
Технически допустимая масса, приходящаяся на заднюю ось, кг	11 500
Технически допустимая масса, кг	18 000

Учебное издание

АТАМАНОВ Юрий Евгеньевич
ПЛИЩ Владимир Николаевич

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И АВТОНОМНОГО
ТРАНСПОРТА. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 05
«Электрический и автономный транспорт»

Редактор *А. С. Мокрушников*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 28.04.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 10,52. Уч.-изд. л. 8,23. Тираж 100. Заказ 253.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.