

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Гребнев Иван Алексеевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК
НА РАСХОД ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
В ТЯГЕ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Пудовиков Олег Евгеньевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ.....	10
1.1 Аэродинамика железнодорожного подвижного состава и методы её исследования.....	10
1.2 Обзор методов определения аэродинамического сопротивления	16
1.3 Обзор работ в области влияния ветра на тягу поездов	18
1.4 Методики нормирования и анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.....	29
<i>1.4.1 Статистический метод обработки маршрутов машинистов с целью нормирования энергозатрат на тягу поездов</i>	<i>29</i>
<i>1.4.2 Инструкция ЦТ/2564 «По техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов»</i>	<i>35</i>
<i>1.4.3 Методика анализа результатов расхода топливно- энергетических ресурсов на тягу поездов «ЦТД26»</i>	<i>36</i>
<i>1.4.4 Методика по инструкции № 512 и распоряжению № 962р ОАО «РЖД».....</i>	<i>37</i>
1.5 Обоснование выбора участка для исследования	38
1.6 Характеристики подвижного состава на исследуемом участке.....	41
1.7 Выводы по первому разделу	45
2 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАРШРУТОВ МАШИНИСТОВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА РАСХОД ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ	47
2.1 Методика сбора и обработки статистической информации	47

2.2 Анализ влияния на расход топливно-энергетических ресурсов среднего значения осевой нагрузки в поезде	55
2.3 Анализ гистограмм удельного расхода топлива	58
2.4 Выводы по второму разделу	63
3 ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУЗОВОГО Поезда при действии на него ветровых нагрузок	64
3.1 Методика выполнения исследования	64
3.2 Модель поезда и ветровой нагрузки	69
3.3 Анализ результатов расчёта	74
3.4 Выводы по третьему разделу	93
4 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ Поезда и методика выполнения тягового расчёта с учётом влияния ветровых нагрузок	95
4.1 Уравнение движения поезда	95
4.2 Методика учёта сопротивления движению поезда	96
4.3 Модель передачи мощности тепловоза и определение расхода топлива	104
4.4 Определение расхода топлива на тягу поезда с применением разработанной модели	118
4.5 Выводы по четвёртому разделу	120
5 УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ НОРМИРОВАНИЯ Топливо-энергетических ресурсов на тягу поездов при наличии ветровых нагрузок	122
5.1 Методика нормирования при наличии ветровых нагрузок	122
5.2 Методика нормирования на основе тягового расчета с использованием имитационной модели поезда	126
5.3 Выводы по пятому разделу	129

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Основой топливно-энергетической политики ОАО «РЖД» является экономия топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на тягу поездов. Так, согласно ежегодному отчету компании, в 2024 году планируется снизить потребление дизельного топлива на 18 % и достичь уменьшения энергоемкости перевозок на 3,4 % относительно 2023 года [60, 62, 83], при этом ожидаемая экономия от снижения потребления дизельного топлива составит 25 млрд рублей.

На расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) влияет значительное число факторов, среди которых вес поезда, осевая нагрузка, техническая скорость, количество остановок. Ряд факторов, влияющих на расход, определяется величиной сопротивления движению поезда [54].

Известно, что в некоторых регионах страны на расход энергоресурсов влияют природные и климатические условия, способствующие значительному увеличению сопротивления движению. Одним из таких климатических факторов является ветровая нагрузка, вызывающая увеличение силы сопротивления движению из-за образования повышенного по сравнению с безветренными условиями перепада давления на поверхностях тела, подверженного действию ветра [30, 81]. В полной мере влияние этого фактора проявляется в регионах, относящихся к ветровым районам, которые характеризуются значительной скоростью ветра, превышающей 12 м/с и продолжительностью действия 10 – 15 % в году. К таким регионам относятся территории Южного федерального округа, Северо-Кавказского федерального округа, Приморский край, Сахалинская область, Республика Коми [17]. Опыт эксплуатации дает многочисленные примеры подтверждения существенного влияния ветра на движение поездов и расход топлива. Такое влияние часто отмечается на Северо-Кавказской, Приволжской, Западно-Сибирской дорогах, где сильные ветры вызывают задержки поездов и способствуют значительному повышению расхода энергии. При этом необходимо

отметить, что в настоящее время методик нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов при наличии ветровых нагрузок нет [51, 52, 92].

Степень разработанности темы исследования. Вопросам аэродинамики подвижного состава железных дорог, влияния ветра на тягу поездов, а также нормированию энергоресурсов на тягу посвящены исследования ряда организаций: Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), РУТ (МИИТ), Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), а также труды работы многих отечественных и зарубежных учёных: П. Н. Астахова, А. А. Бакланова, А. А. Воробьёва, А. Н. Долганова, Л. А. Мугинштейна, В. Г. Постола, В. Е. Розенфельда, Е. А. Сидоровой, Н. Н. Сидоровой, П. П. Стромского, В. П. Феоктистова, Н. А. Чуркова, Г. Реми, А. Тривелла и других [4, 10, 21, 69, 74, 76, 77, 80, 84, 90, 91, 93, 112, 117].

К настоящему времени в Правилах тяговых расчетов (ПТР) предложен алгоритм учета влияния ветрового потока на увеличение дополнительного сопротивления движению поезда в зависимости от скорости ветра и плотности воздуха, не учитывающий взаимное направление векторов скоростей воздушного потока и поезда [19]. Существующие методики нормирования расхода ТЭР не учитывают фактор ветровой нагрузки, действующей на поезд, способствующий увеличению расхода энергоресурсов, затрачиваемых на тягу. Таким образом, выполнение оценки влияния ветровых нагрузок на величину сопротивления движению поезда с учётом взаимного направления векторов скоростей воздушного потока и поезда, а также совершенствование методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу с учётом ветрового воздействия является актуальной задачей.

Целью диссертационного исследования является совершенствование методики нормирования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в регионах со значительными ветровыми нагрузками.

Для достижения заданной цели были поставлены следующие **задачи**:

- выполнить анализ существующих методик нормирования топливно-энергетических ресурсов, затрачиваемых на тягу поездов;
- выявить методами статистического анализа влияние ветровых нагрузок на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов;
- разработать методику имитационного эксперимента по определению величины и характера изменения аэродинамического сопротивления для подвижного состава при различных сочетаниях скорости ветра и поезда, а также направлениях ветрового потока относительно направления движения поезда;
- разработать математическую модель поезда для выполнения тяговых расчётов с учётом ветровых нагрузок, действующих на подвижной состав;
- разработать математическую модель передачи мощности тепловоза для определения мгновенного и суммарного расхода топлива на тягу по результатам выполнения тягового расчёта;
- разработать предложения по уточнению методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

Научная новизна:

- установлено влияние на величину аэродинамического сопротивления поезда его скорости и скорости ветрового потока, а также их взаимного направления;
- установлен характер изменения величин сил аэродинамического сопротивления, действующих на группы вагоны в разных частях поезда, при ветровом воздействии. Найденные зависимости позволяют экстраполировать полученные результаты на поезд произвольной длины;
- доказана удовлетворительная сходимость результатов, полученных с применением имитационных моделей по определению величин аэродинамического сопротивления и выполнения тягового расчёта с данными, полученными в процессе эксплуатации подвижного состава.

Теоретическая и практическая значимость:

– разработана имитационная модель, а также методика выполнения эксперимента, позволяющая определить величину аэродинамического сопротивления, действующего на вагоны поезда в условиях действия ветровой нагрузки;

– предложена методика выполнения тягового расчёта, позволяющая учитывать влияние ветрового воздействия на поезд при произвольном сочетании скоростей ветра и подвижного состава, а также их взаимные направления;

– предложен способ численного моделирования энергетической цепи тепловоза и учитывающий коэффициенты полезного действия составляющих её элементов, позволяющий определить мгновенный и суммарный расход топливно-энергетических ресурсов на тягу и дающий достаточное совпадение с результатами обработки информации по учёту топлива в эксплуатации;

– доказана необходимость расширения системы нормообразующих факторов при нормировании расхода ТЭР фактором ветровой нагрузки, действующей на поезд. Разработаны предложения по уточнению методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, позволяющие повысить объективность установления норм расхода топлива на тягу поездов.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использовались следующие методы:

– метод анализа – при обзоре ранее выполненных работ в области аэродинамики и нормирования энергоресурсов;

– метод статистического анализа – с его помощью осуществляется анализ и обработка информации, полученных непосредственно в ходе реальных поездок на основе данных маршрутов машинистов;

– метод модельного эксперимента – при выполнении исследований на модели грузового поезда в программных комплексах и имитационной математической модели для нахождения расхода топлива;

– метод синтеза – при оценке полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- метод статистической обработки данных маршрутов машинистов для определения факторов, влияющих на расход топлива;
- модель поезда для нахождения аэродинамического сопротивления;
- результаты расчётов по определению величин углов направления ветрового потока, при которых достигается максимальная сила аэродинамического давления;
- имитационная модель поезда для нахождения расхода топлива;
- методология нормирования расхода топлива для локомотивных депо.

Достоверность и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с результатами, полученными другими авторами, а также результатами обработки экспериментальных данных.

Основные положения и результаты диссертации были представлены и обсуждались на научных мероприятиях, в том числе на международных и всероссийских научно-практических конференциях:

- Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2021», 2021, г. Москва, РУТ (МИИТ);
- Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2022», 2022, г. Москва, РУТ (МИИТ);
- IX международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», г. Орел 2023 г.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ), подтверждены соответствующим актом, представленным в приложении Б.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

1.1 Аэродинамика железнодорожного подвижного состава и методы её исследования

Аэродинамика является областью аэрогидромеханики, изучающей законы движения и равновесия жидкости и газов, и их силового взаимодействия с обтекаемыми телами или граничными поверхностями [34, 39].

Величина силы, действующей на обтекаемое тело, определяется скоростью потока жидкости (газа), площадью поперечного сечения тела и его удлинением, формой головной и кормовой частей, свойствами поверхности обтекаемого тела, параметрами жидкости (газа) [13, 29, 33].

Скорость потока, плотность вязкой среды, образующей поток, определяют величину скоростного напора, действующего на тело. Данная величина в сочетании с наибольшей площадью поперечного сечения и коэффициентом аэродинамического сопротивления, характеризующим форму тела и характер обтекания его потоком жидкости (газа), определяют величину силы давления, действующей на тело, помещённое в движущуюся вязкую среду [12, 79].

Необходимо отметить, что движущееся тело вследствие наличия у текучей среды вязкости увлекает за собой часть жидкости (газа), образуя так называемый пограничный слой вокруг движущегося тела, оказывающий влияние на аэродинамическое сопротивление. Размеры пограничного слоя зависят от формы тела, величины вязкости, скорости движения потока относительно тела [56, 95].

Для снижения воздействия воздушной среды на поезд выполняется оптимизация форм и конструкции вагонов. Так, находят применение поперечные очертания кузовов вагонов, способствующие повышению запасов устойчивости от опрокидывания, что позволяет повысить скорость движения, обеспечив соблюдение требований безопасности движения поездов [106, 114]. Также

оценивается оптимальная конструкция и геометрия подвижного состава, позволяющие снизить затраты энергоресурсов на тягу. Ещё одним важным направлением исследования является снижение уровня аэродинамических шума и вибраций, которые могут причинять дискомфорт пассажирам, возникающих в процессе движения поезда и оказывающие негативное влияние как на пассажиров поезда, так и на всех, находящихся вблизи железной дороги в области действия шума [111].

Поезд в аэродинамике рассматривается как тонкое тело значительного удлинения, которое обладает низкой обтекаемостью, движущееся при дозвуковых скоростях вблизи экрана [93]. Аэродинамические характеристики поезда зависят от многих факторов, включая скорость движения, расположение вагонов в составе поезда, длину, обтекаемость вагонов и локомотива, загрузку и тип груза. Основными факторами, определяющими величину сопротивления воздушной среды применительно к железнодорожному поезду, являются [38, 93]:

- напор воздуха, действующий на лобовую часть и отрыв воздушного потока от поверхности поезда;
- характер обтекания воздушным потоком поверхности отдельных экипажей поезда и течение в междувагонных промежутках и особенно в промежутке между локомотивом и первым вагоном, затраты энергии на поддержание вихрей, возникших в результате появления отрывного течения;
- неоднородность поверхности поезда, сопровождающаяся локальным изменением площади поперечного сечения, наличием выступающих частей и прочее;
- вязкое трение между поверхностью поезда и воздухом;
- интенсивное перераспределение воздушного потока в области под поездом из-за неоднородности поверхности подкузовного пространства, а также вращения колёсных пар, создающих эффект вентилятора.

Таким образом, для оптимизации аэродинамических характеристик поездов необходимо учитывать перечисленные факторы и проводить дальнейшие исследования в этой области. Это поможет снизить энергопотребление, уменьшить

воздействие на окружающую среду и повысить безопасность движения на железных дорогах.

Значительный вклад в решение задач аэрогидромеханики внесли: О.М. Белоцерковский, Д. Бернулли, Г. Гельмгольц, Ж. Даламбер, Н. Е. Жуковский, Т. фон Карман, Г. Кирхгоф, Э. Мариотт, Л. Навье, И. Ньютон, Л. Прандтль, О. Рейнольдс, Д. Стокс, С. А. Чаплыгин, Г. Г. Чёрный, Л. Эйлер, А. Эйфель и многие другие учёные.

Основы теоретической гидродинамики заложили Леонард Эйлер и Даниил Бернулли. Л. Эйлер вывел основные дифференциальные уравнения движения идеальных жидкостей и газов. Д. Бернулли сформулировал фундаментальный закон гидродинамики, устанавливающий связь между давлением и скоростью в потоке несжимаемой жидкости [96].

Применительно к железнодорожному транспорту, вопросы аэродинамического сопротивления поезда были впервые изучены в нашей стране инженером и конструктором В. И. Лопушинским в 70-х годах XIX века. По результатам его опытов были выведены первые эмпирические зависимости для определения основных удельных сопротивлений паровозов, пассажирских и грузовых вагонов. В формулах В. И. Лопушинского сопротивление движению зависит только от скорости движения [44].

Вопросы аэродинамического сопротивления поезда продолжил изучать в своих исследованиях профессор Г. Н. Абрамович. Он предложил рассматривать полное аэродинамическое сопротивление как сумму воздушного сопротивления локомотива, вагонов и кормового сопротивления последнего вагона. Воздушное сопротивление вагонов включает в себя трение о стенки и выступающие части кузова, а также трение воздуха в междувагонном пространстве и лобовое сопротивление подвагонного оборудования [1].

В 1950 – 1960-х годах проводились эксперименты по продувке масштабных и реальных моделей подвижного состава в аэродинамических трубах для определения полного аэродинамического сопротивления. В результате этих

экспериментов были получены безразмерные коэффициенты сопротивления воздуха для определенных типов вагонов и локомотивов [4, 99].

С началом развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в 1960 – 1970-е годы прошлого века исследования аэродинамического сопротивления поездов продолжились. Учёные ВНИИЖТа Е. М. Сюзюмова, Г. А. Романенко [86] предложили учитывать аэродинамическое сопротивление отдельных элементов подвижного состава при расчете полного коэффициента аэродинамического сопротивления поезда. Эти элементы включают: крышу, боковые поверхности, донную поверхность (где происходит относительное движение воздуха), междувагонные промежутки, подвагонное пространство, колеса, головную и хвостовую части, а также надстройки. Коэффициенты аэродинамического сопротивления для крыши и боковых поверхностей определяются с использованием полуэмпирической теории Прандтля для переноса импульса и образования вихрей. Работа [86] ориентирована на исследование аэродинамики высокоскоростных поездов, форма и конфигурация вагонов которых значительно отличаются от грузовых. Для определения аэродинамического сопротивления донной поверхности поезда использовался логарифмический закон Прандтля – Шлихтинга для распределения скоростей на пластинах с однородной шероховатостью. Коэффициент аэродинамического сопротивления междувагонных пространств определялся на основе экспериментальных данных Викхарда. Для оценки аэродинамического сопротивления, вызванного вращением колёс, используется теория турбулентного потока для вращающегося диска Кармана [104].

Большой вклад в изучение аэродинамики поезда проделали учёные Петербургского университета путей сообщения [93]. Так, д.т.н., профессор Н. А. Чурков показал, что аэродинамические характеристики поезда определяются скоростью движения, расположением вагонов в составе, степенью аэродинамического совершенства вагонов и локомотивов, условиями движения по пути, а также состоянием аэродинамических связей, как внутри поезда, так и вне его с объектами инфраструктуры железнодорожного транспорта, которые

находятся в непосредственном взаимодействии с ним. Аэродинамическое сопротивление движению поезда зависит от его вида, длины, типа вагонов, их загруженности, расположения в составе. Полякова Е. Я. в работах, выполненных под руководством заведующего кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС д.т.н. профессора Ю. П. Бороненко, предложила модель изучения воздействия аэродинамических нагрузок на высокоскоростной подвижной состав с учетом оптимального выбора формы кузова и расположения подвагонного оборудования, а также при взаимодействии поезда с элементами инфраструктуры и железнодорожной насыпью [68]. Поляков Б. О. выполнил исследование аэродинамики грузового поезда в зависимости от загрузки вагонов, формы кузова, подвагонного оборудования грузового вагона [66], сделав выводы о необходимости учета загрузки вагонов при расчете затрат энергии на тягу поездов [67]. Было исследовано аэродинамическое сопротивление поезда при его движении в тоннеле [37], взаимодействие токоприёмника и контактного провода в поле воздействия воздушного потока [10], взаимодействие инфраструктуры с движущимся подвижным составом [50]. Проводятся опыты по определению аэродинамического сопротивления современных грузовых вагонов [40].

За рубежом также выполнено значительно количество исследований в области аэродинамики железнодорожных поездов, в том числе высокоскоростных [109, 113, 114]. Вместе с этим, статьи зарубежных авторов, посвящённые влиянию ветровых нагрузок на поезд, направлены на выбор оптимального с точки зрения энергозатрат режима ведения поезда, а также условиям устойчивости экипажа влияниям бокового ветра [101, 103, 117]. Значительное количество исследований выполнено в области оптимизации формы очертаний локомотивов, вагонов поезда для снижения аэродинамического воздействия [101, 107], а также повышения безопасности движения поездов за счёт обеспечения устойчивости вагонов и груза от опрокидывания [102, 112, 116]. При решении задач подобного класса в настоящее время находят применение методы нейронных сетей, искусственного интеллекта и бионики [110].

Существует значительное количество подходов и допущений, позволяющих выполнять исследование течения жидкости или газа и взаимодействие этого потока с твёрдыми телами [95].

Исторически первой моделью, описывающей взаимодействие потока жидкости и твёрдого тела, считают корпускулярную модель И. Ньютона. Он считал жидкость состоящей из маленьких корпускул – отдельных частиц. Эти частицы, перемещаясь с некоторой скоростью, приходят в соприкосновение с обтекаемым телом, в результате чего возникает сила, действующая на тело. Ньютон считал удар частиц о тело абсолютно неупругим, т. е. частицы не отскакивают при ударе, а как бы прилипают к телу [49], при этом за телом образуется теневая область, в которой частицы отсутствуют. Ещё современниками было отмечено, что модель Ньютона не соответствует наблюдаемым результатам эксперимента, в частности, в опытах по определению величин сил, действующих на тело, помещённое в поток воздуха.

Имеющиеся противоречия разрешила модель обтекания твёрдого тела, предложенная Л. Эйлером. Эта модель положена в основу всей теории идеальной жидкости. По Эйлеру, жидкость, набегающая на твёрдое тело, представляет собой сплошную среду – континуум – и может быть разбита на струйки [8]. Под струйкой понимают жидкость, текущую внутри некоторой замкнутой поверхности, образованной траекториями частиц жидкости. Согласно модели Эйлера, поток жидкости обтекает тело, воздействуя на него со всех сторон, а не только со стороны набегающего потока. Характер обтекания в итоге определяет силы, действующие на тело со стороны набегающего потока.

Существует два способа исследования движения жидкостей и газов: метод Эйлера и метод Лагранжа. В обоих подходах жидкость считается непрерывной средой, которая заполняет всё рассматриваемое пространство. Мельчайший элемент жидкости – это «частица» бесконечно малых размеров, не являющейся молекулой или атомом. Поэтому такой способ не подходит для изучения молекулярных движений [39].

В настоящее время основным способом выполнения исследований являются исследования с помощью математического моделирования процессов на основе

методов вычислительной гидродинамики, которая базируется на решении дифференциальных уравнений движения вязкой сжимаемой жидкости Навье-Стокса и уравнения неразрывности [13].

1.2 Обзор методов определения аэродинамического сопротивления

В настоящее время, существует несколько методов определения аэродинамического сопротивления подвижного состава:

- натурные эксперименты;
- испытания физических моделей в аэродинамической трубе;
- численные методы решения задач.

Натурные эксперименты заключаются в испытании полномасштабных моделей подвижного состава в реальных условиях, что позволяет учесть влияние нескольких факторов на величину сопротивления движению и получить действительные значения действующих на обтекаемое тело сил. Наибольшее распространения получили два метода проведения натурных экспериментов. Первый – при помощи динамометрического вагона. Данный метод отличается простотой, наглядностью, но имеет ряд недостатков, в частности отсутствия возможности выявления отдельных составляющих силы сопротивления движению, а также не учитывает основные силы, действующие на локомотив, так как динамометрический вагон в составе поезда ставится непосредственно за ним. Второй – метод скатывания. Он уже позволяет оценить действие сил, оказывающих влияние на самоходный подвижной состав, однако, его недостатком также остается невозможность выявить долю составляющих в общем сопротивлении движению подвижного состава [93]. Несмотря на все достоинства экспериментального метода исследований, у него, тем не менее, существует целый ряд недостатков, к наиболее существенным из которых относятся высокая стоимость и существенные сложности при обеспечении повторяемости результатов.

Другим способом, используемым для исследования процессов, происходящих во время движения поезда в воздушной среде, является проведение испытаний реальных поездов или их физических моделей в аэродинамической трубах. Так, подобные работы позволили выработать общие подходы к нахождению более совершенных обтекаемых форм лобовой части подвижного состава [86]. Данный способ основан на принципе обратимости движения и теории подобия физических явлений. К недостаткам данного метода можно отнести сложность создания динамического подобия эксперимента в трубе в соответствии с реальными условиями.

Современная методология оценки аэродинамического влияния основывается на методах вычислительной гидродинамики. Вычислительная гидродинамика – это процесс исследования физического течения жидкости (газа) путём решения дифференциальных уравнений движения с использованием вычислительных мощностей. *CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics modeling)* – один из подразделов механики сплошных сред. Данный метод призван вычислять характеристики потоковых процессов при помощи вычислительных и физико-математических методов. В то время как испытания в аэродинамической трубе дают высоконадежные значения измеренных сил, инструменты *CFD* снижают стоимость и упрощают проведение детальных исследований [11].

Во всех подходах *CFD*-анализа применяется одна и та же базовая методология, которая заключается в предварительной обработке, создании геометрии исследуемого объекта, задания объёма области исследования и разбиения этой области на ячейки, определения критериев моделирования, определения граничных условий поведения и свойств жидкости на всех граничных поверхностях области текучей среды, обработки и анализа результатов расчётов [3].

Чаще всего для решения поставленных задач применяют прямое численное моделирование. Прямое численное моделирование (англ. *DNS (Direct Numerical Simulation)*) – один из методов численного моделирования течений жидкости или газа. Преимущество его заключается в возможности разбиения расчетной области

на мелкую сетку, что позволяет эффективно использовать вычислительные возможности [2, 3].

Метод основан на численном решении системы уравнений Навье-Стокса и позволяет моделировать в общем случае движение вязких сжимаемых газов с учётом химических реакций, притом как для ламинарных, так и турбулентных течений [115]. Данный способ удобен тем, что рассчитывать случайные характеристики турбулентности при интегрировании трехмерных нестационарных уравнений нет необходимости, однако, система является незамкнутой и требует дополнительных соотношений, которые могут быть получены только с помощью эксперимента.

Для определения аэродинамических сил, действующих на подвижной состав, при помощи численных экспериментов часто используют следующие программные комплексы, основанные на методах вычислительной гидрогазодинамики, такие как *ANSYS Fluent*, *SOLIDWORKS Flow Simulation*, *Autodesk Simulation CFD*, *AERO*, Логос.

1.3 Обзор работ в области влияния ветра на тягу поездов

Ветер со скоростью, превышающей 12 м/с оказывает существенное влияние на различные службы железнодорожного транспорта (рисунок 1.1) [5, 6], а именно:

- на объекты службы сигнализации и связи;
- на объекты электрификации и энергетического хозяйства;
- на объекты службы контейнерных перевозок и коммерческой работы;
- на объекты локомотивной службы;
- на работу службы движения.

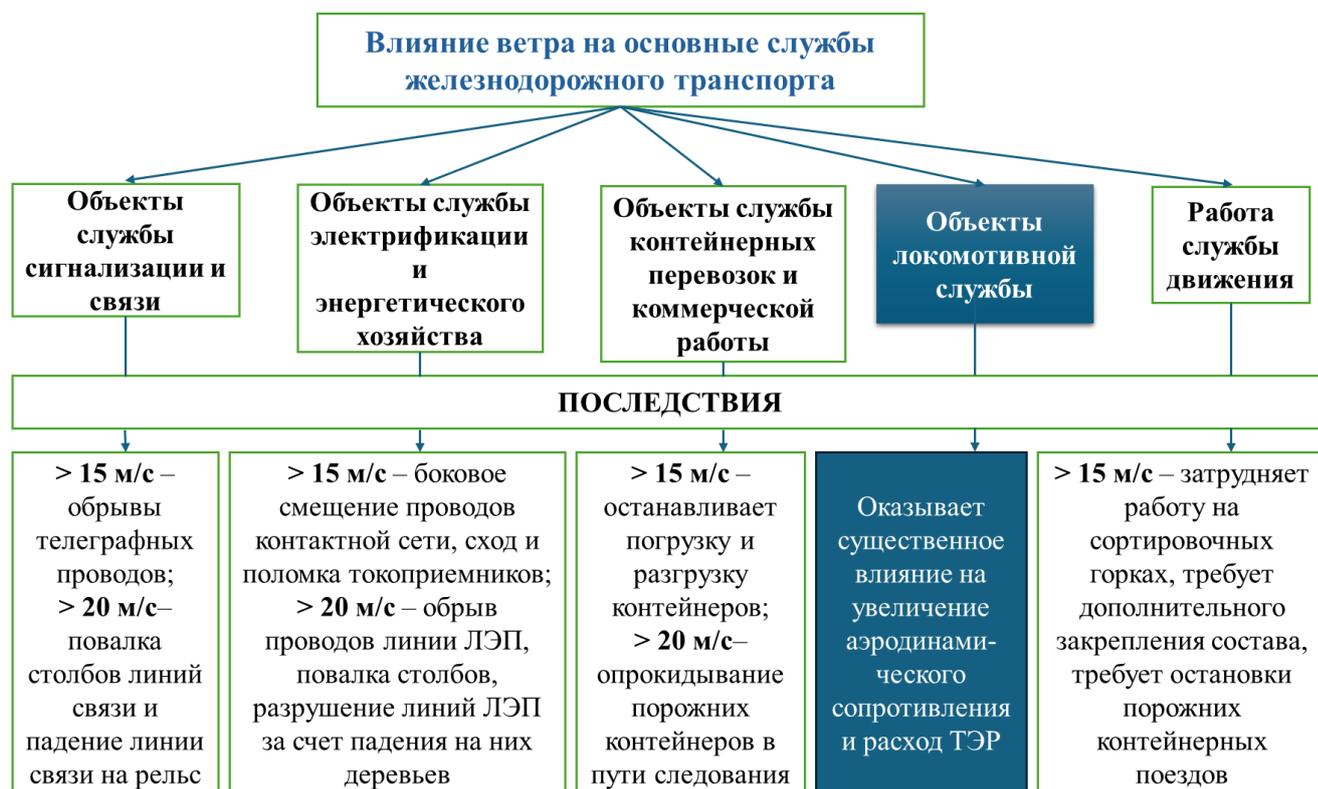


Рисунок 1.1 – Влияние ветра на основные службы железнодорожного транспорта

Применительно к тяге поездов, влияние ветра обусловлено повышением удельного сопротивления движению поезда, что ведёт к дополнительным затратам энергии на его преодоление и требует усовершенствования методики нормирования затрат энергоресурсов на тягу в локомотивных депо.

Исследование проблемы влияния ветровых нагрузок на железнодорожный транспорт имеет значительную историю. Ветер оказывает воздействие на увеличение дополнительного сопротивления движению, боковую устойчивость, аэроупругие колебания элементов подвижного состава, энергозатраты на тягу.

Согласно ПТР [19, 20], дополнительное сопротивление движению поездов от встречного и бокового ветра предлагается учитывать коэффициентом K_v , зависящим от скорости движения поезда. В ПТР приведена следующая рекомендация: «Для графика движения поездов дополнительное сопротивление движению от встречного и бокового ветра учитывать при скоростях ветра свыше 12 м/с [19]. При скоростях ветра, превышающих 12 м/с, это дополнительное сопротивление учитывается на период возникновения особо неприятных погодных

условий. Значения коэффициентов K_B в этих расчетах принимать по номограммам, которые представлены в ПТР для различных значений плотности воздуха ρ , определяемой по формуле» [19]:

$$\rho = 0,35 \frac{H_{\text{бар}}}{t_{\text{нв}} + 273}, \quad (1.1)$$

где $H_{\text{бар}}$ – атмосферное давление, гПа;

$t_{\text{нв}}$ – температура наружного воздуха, °С.

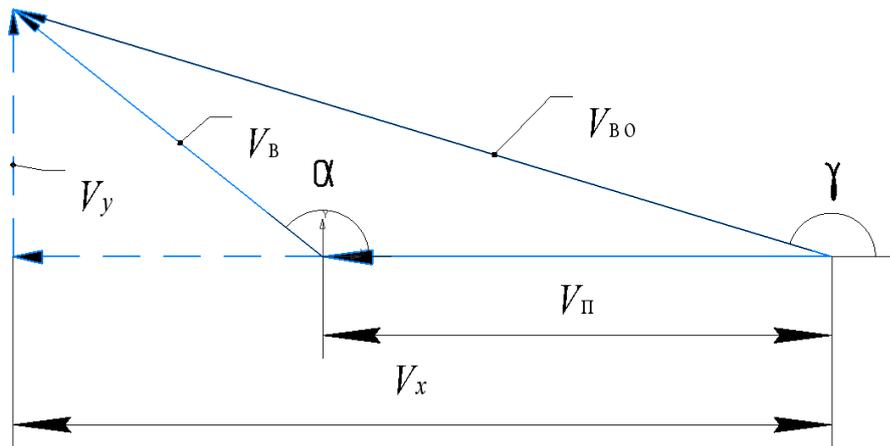
Перечень участков, которые подвержены ветровому воздействию, а также скорости ветра, используемые при выполнении расчётов для каждого периода, устанавливаются управлением дороги на основе многолетних данных метеослужбы и утверждаются ОАО «РЖД».

Среди отечественных учёных влиянием ветра на тягу поездов занимался в конце 50-х годов XX века во ВНИИЖТ к.т.н. П.П. Стромский [84, 85]. Им было установлено, что в ряде случаев это влияние имеет существенное значение, и было выдвинуто предположение о том, что движение поезда при ветре можно рассматривать как движение в воздушном потоке, имеющем относительную скорость, равную сумме относительной скорости воздуха при движении поезда в спокойной атмосфере и скорости ветра рисунок 1.2.

Результирующая относительная скорость ветра выражается формулой:

$$V_{\text{во}} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (1.2)$$

П. П. Стромским было установлено, что ветер со встречных направлений увеличивает сопротивление подвижного состава на большую величину, чем попутные уменьшают его. Поэтому на участках дорог с сильными ветрами удельный расход энергии на тягу поездов выше. Зелёные насаждения уменьшают дополнительное сопротивление от ветра и способствуют понижению расхода энергоресурсов на тягу. В этой связи учёный предложил, что следует провести специальные исследования по определению аэродинамических характеристик вагонов и поездов для оценки их качеств и выявления влияния воздушных потоков на сопротивление движению [84].



V_B – скорость ветрового потока, (м/с); V_{Π} – скорость движения поезда, (м/с);
 V_{Bo} – результирующая относительная скорость воздуха, (м/с); V_x , V_y – относительные скорости воздуха вдоль железнодорожной линии и в направлении, перпендикулярном движению;
 α – угол между направлением ветра и направлением движения поезда, град; γ – угол между результирующей относительной скоростью ветра и направлением движения поезда, град

Рисунок 1.2 – К реализации метода сложения скоростей воздуха

Несмотря на это, при производстве тяговых расчетов дополнительное сопротивление от ветра обычно не принимают во внимание.

В работах, выполненных за рубежом и направленных на определение влияния ветра на величину сопротивления движения было установлено, что сопротивление движению поезда увеличивается на 30 % по сравнению с его средним значением [100].

Несмотря на то, что при выполнении расчетов по нормированию ТЭР на тягу влияния ветра не учитывается, при проектировании сортировочных горок, наличие встречного и попутного ветра учитывается и определяются по формуле [4]:

$$W_B = 0,067v_B^2\Omega, \quad (1.3)$$

где v_B – скорость ветра, м/с;

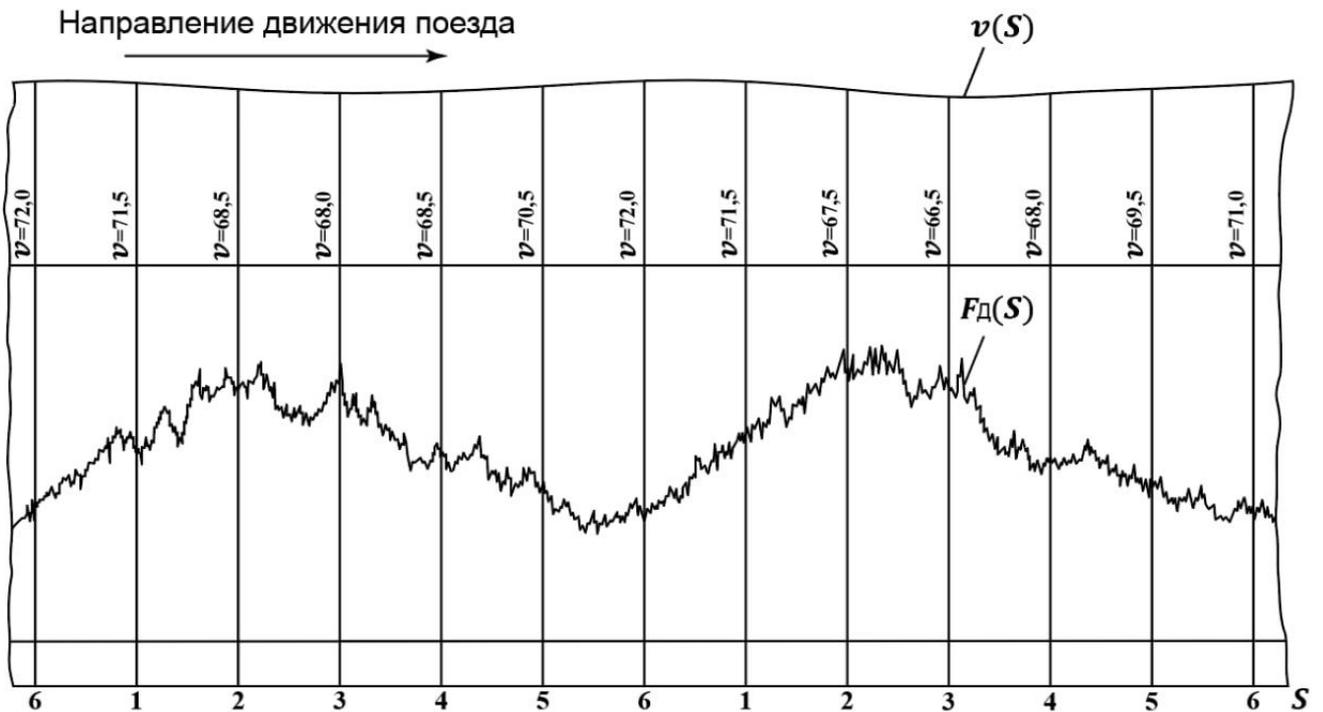
Ω – поперечное сечение поезда, м².

Более детальные исследования влияния ветра на расход ТЭР на тягу поездов были проведены П. Н. Астаховым [4], на экспериментальном кольце ВНИИЖТ, которое имеет форму правильного круга, при движении по которому поезд подвергается воздействию ветра таким образом, что угол обдувки изменяется равномерно. Это ситуация эквивалентна тому, как если бы поезд двигался

прямолинейно в неизменном направлении, а ветер равномерно изменял свое направление относительно него.

Методика количественной оценки влияния ветра на величину сопротивления заключалась в следующем. На основании силомерных лент, полученных в процессе опытных поездок с применением динамометрического вагона-лаборатории, на котором выполнялось измерение силы тяги локомотива, определялась средняя на протяжении всего кольца величина ветрового сопротивления, а затем на основании пиковых значений сопротивления определялся угол обдува ветра в той точке, где он был зафиксирован.

В результате опытных поездок с вагоном-динамометром для фиксации сопротивления движению была получена силомерная лента с непрерывными кривыми динамометрической силы тяги $F_D(S)$ и скорости $v(S)$ движения в зависимости от пройденного пути S (рисунок 1.3).



$F_D(S)$ – кривая силы тяги; $v(S)$ – кривая скорости движения; S – пройденный путь

Рисунок 1.3 Образец силомерной ленты опытной поездки на экспериментальном кольце

Силомерная лента была ориентирована по пикетным и километровым знакам на протяжении всех 6 км кольца, что позволило определить зависимость силы сопротивления относительно направления ветра в течение всего опыта. На каждом километре фиксировалась скорость движения, по значениям которой построен график $v(S)$. По оси ординат отмечены значения скорости и силы тяги, а по оси абсцисс – пройденного пути. Из силомерной ленты опытной поездки рисунок 1.3 [4], полученной во время движения в ветреную поездку видно, что сила тяги $F_D(S)$ изменяется приблизительно по синусоиде с незначительными отклонениями. Такая форма изменения кривой силы тяги обусловлена влиянием ветра, что проявляется в изменении его направления. В безветренную погоду силомерная лента силы тяги имеет вид прямой линии, параллельной нулевой горизонтальной линии.

На основании проведённых опытов по фиксации силы тяги на силомерных лентах можно судить и об относительной величине (в процентах) изменения дополнительного сопротивления движению от ветра \bar{w}_B , полученных опытным путём. Относительная величина \bar{w}_B получена из следующего соотношения:

$$\bar{w}_B = \frac{w_B}{w_a}, \quad (1.4)$$

где w_B – удельное сопротивление от ветра, Н/кН;

w_a – удельное аэродинамическое сопротивление, Н/кН.

На рисунках 1.4 и 1.5 [4] представлены величины отношения (в процентах) дополнительного сопротивления движению поезда от ветра w_B при различных скоростях бокового ветра v_B (сплошные линии) и при таких же скоростях встречного ветра (пунктирные линии) в процентном соотношении от величины аэродинамического сопротивления движению поезда w_a , значения которых отмечены по оси ординат для порожних (рисунок 1.4) и для гружёных (рисунок 1.5) вагонов в составе поезда в зависимости от скорости движения поезда v , которая отложена по оси абсцисс.

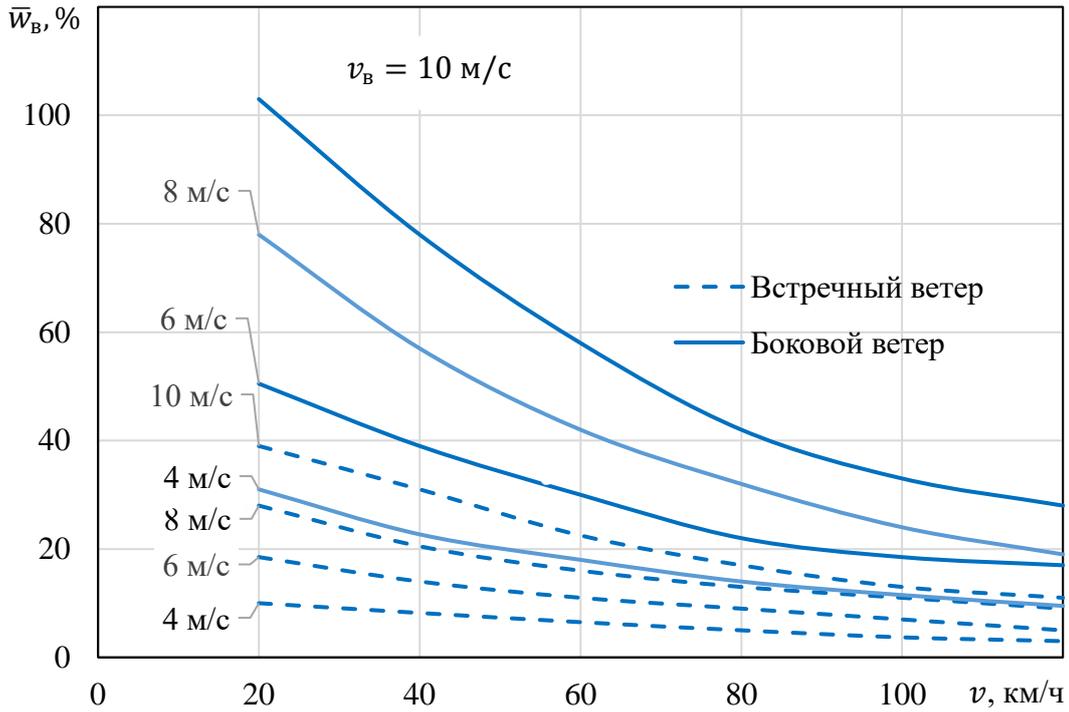


Рисунок 1.4 – Относительное сопротивление движению вагонов в зависимости от скорости движения поезда и скорости ветрового потока для состава из порожних вагонов

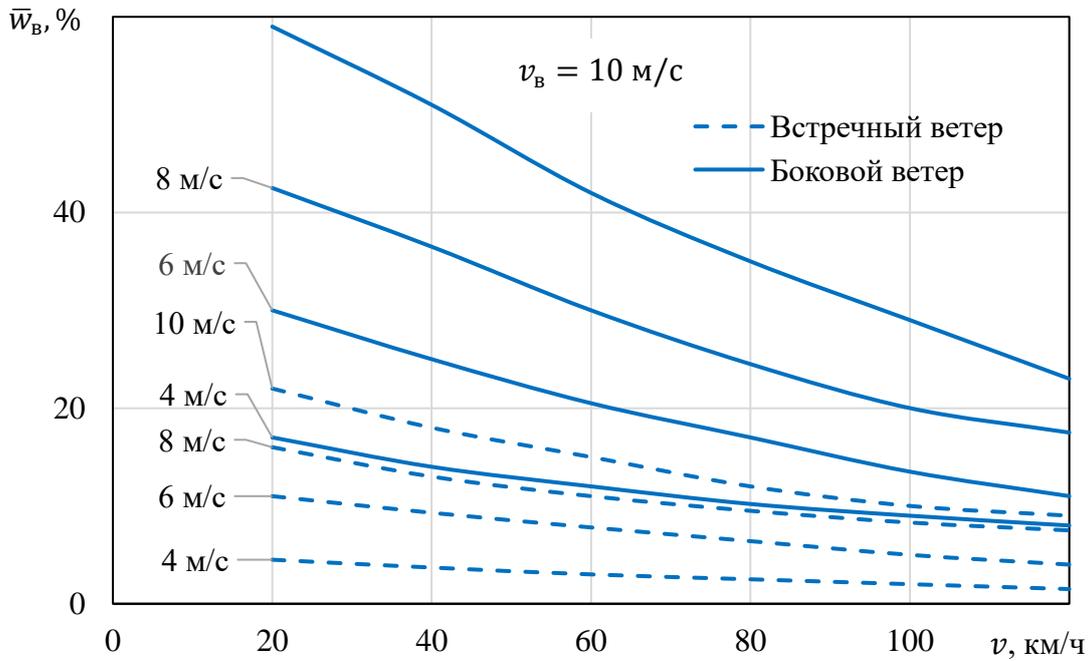


Рисунок 1.5 – Относительное сопротивление движению вагонов в зависимости от скорости движения поезда и скорости ветрового потока для состава из гружёных вагонов

Из этих графиков видно, что дополнительное сопротивление от встречного ветра при скорости ветра 10 м/с и скорости движения поезда 60 км/ч составляет примерно 21 % для порожних и 17 % для гружёных вагонов от основного сопротивления движению соответственно. При тех же начальных условиях, но уже при боковом направлении ветра эти величины будут составлять уже 58 и 40 % соответственно.

Как видно из представленных результатов (рисунок 1.4), ветер является одним из наиболее существенных факторов, обуславливающим большой разброс значений опытных величин основного сопротивления движению подвижного состава [4].

Большой вклад в исследование аэродинамического сопротивления, в том числе от ветра, внёс профессор Петербургского университета путей сообщения Н. А. Чурков. В своих исследованиях, которые проводились на физических моделях в аэродинамической трубе Ленинградского политехнического института, изменяя угол обдува, он установил, что [94]:

- применяемые нормы расчета ветровых нагрузок на подвижной состав являются заниженными, и действительные аэродинамические нагрузки могут превышать расчетные значения в 2–4 раза. Это связано с особенностями аэродинамического воздействия ветра на подвижной состав, а также сложными условиями эксплуатации высокоскоростных поездов;

- наиболее опасными для поездов являются поперечные опрокидывающие силы и моменты, возникающие под воздействием бокового ветра. Максимальные значения опрокидывающих сил и моментов наблюдаются при изменении угла направления ветра в диапазоне от 60 до 90 градусов;

- при определении аэродинамических сил и моментов на подвижной состав от бокового ветра, целесообразно использовать справочные таблицы для определения истинных значений скорости и направления ветра и расчётные формулы с экспериментально определёнными значениями аэродинамических коэффициентов [94];

– учёт и анализ аэродинамических воздействий на подвижной состав является важным направлением в обеспечении безопасности движения поездов и повышении эффективности работы железнодорожного транспорта;

– учёт аэродинамических сил при движении поезда в кривых является важным фактором, влияющим на безопасность движения и энергетические затраты на движение поезда;

– характер аэродинамического воздействия бокового ветра на движущийся поезд уникален и требует специального подхода к его анализу. Наиболее опасными являются поперечные силы и моменты, которые достигают максимальных значений при изменении направления ветра от бокового к лобовому;

– при различных скоростях движения подвижного состава наиболее неблагоприятными могут быть разные типы ветра. Например, при низких скоростях наиболее опасным может быть встречный ветер, а при высоких – боковой ветер с определённым диапазоном углов обдува. Встречный ветер является наиболее неблагоприятным при скоростях движения поезда до 20 м/с, а боковой ветер с обдувом от 40° до 60° – при скоростях движения более 20 м/с.

В настоящее время за рубежом развивается направление исследований, связанных с учётом влияния ветровых нагрузок на выбор рациональной с точки зрения расхода энергии траектории ведения поездов [101]. Значимый вклад в исследование энергооптимального движения поезда при наличии во время поездки дополнительных факторов, влияющих на расход, внёс профессор университета в г. Твенте, Нидерланды А. Trivella (А. Тривелла) [117]. Он, как и П. П. Стромский, предложил раскладывать ветровую нагрузку по векторам на продольную и поперечную составляющую и находить результирующую силу. В своих работах им предложен коэффициент аэродинамической составляющей при наличии ветровой нагрузки, выведенный из общей формулы силы сопротивления движению поезда:

$$F = c_1 + c_2 v + c_3 v^2, \quad (1.5)$$

где v – скорость движения подвижного состава, м/с;

c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, зависящие от характеристик пути и подвижного состава.

$$c'_3 = \frac{c_3}{hl} (\xi_1 hl |\cos \gamma| + \xi_2 hL |\sin \gamma|), \quad (1.6)$$

где L – длина поезда, м;

l – ширина поезда, м;

h – высота поезда, м;

γ – угол направления ветрового потока, град;

ξ_1 – коэффициент, учитывающий соотношение продольной к нормальной силе ветрового потока;

ξ_2 – коэффициент, учитывающий соотношение поперечной к нормальной силе ветрового потока.

Результаты численного моделирования ветровой нагрузки при движении поезда по участку, выведенные голландским учёным, представлены на рисунке 1.6. Как видно из данного рисунка максимальная сила сопротивления движению поезда при боковом направлении ветра достигается при угле ветровой нагрузки, направленном под углом $60 - 75^\circ$ [117].

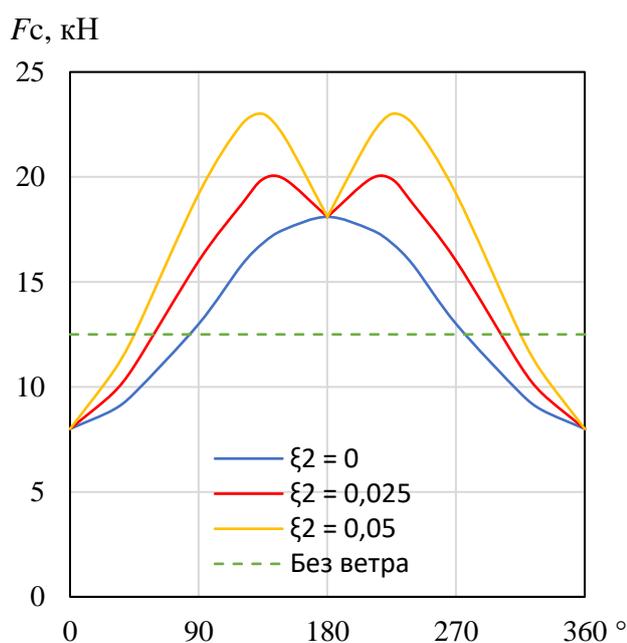
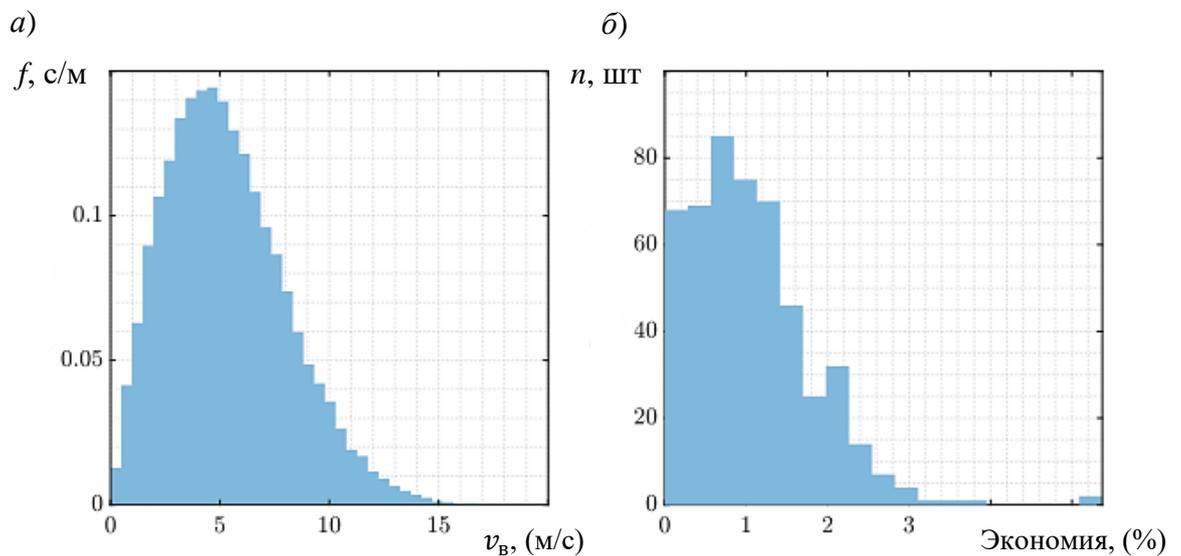


Рисунок 1.6 – Сопротивления движению поезда в зависимости от угла направления ветрового потока

Основные труды А. Тривелла были направлены на нахождение оптимальной энергоэффективной модели движения поезда. На случай движения поезда на ветрозависимых участках, либо при прогнозировании влияния неблагоприятных погодных условий на тягу поездов, предлагается разрабатывать такое расписание движения поезда, которое предусматривало бы снижение его скорости в эти моменты, дабы снизить аэродинамическое сопротивление и расход энергии. Во всех случаях была получена экономия расхода энергоресурсов, достигающая 5 % (рисунок 1.7, б) [117]. Кроме того, им установлено, что при малых скоростях движения, не превышающих 40 км/ч, боковой ветер увеличивает сопротивление движению на 5 %, а уже при скорости 80 км/ч это увеличение достигает 20 %.

По результатам проделанных расчётов были построены гистограммы (рисунок 1.7) [117]. На левой гистограмме (рисунок 1.7, а) приведены данные о плотности f распределения скоростей ветра v_B на рассматриваемом участке, на правой (рисунок 1.7, б) – процент сэкономленной электроэнергии от количества поездов n по энергооптимальной траектории.



а – плотности скорости ветра; б – экономии энергоресурсов от количества поездов

Рисунок 1.7 – Гистограммы плотности распределения исследуемых параметров

Итальянские ученые Ф. Чели, П. Шито, Ж. Томазини [99] занимались изучением влияния бокового ветра на безопасность движения высокоскоростных поездов. Их исследования были направлены на нахождение угла направления бокового ветра при, котором вероятность схода с рельс высокоскоростного поезда будет максимальна. Опыты проводились на физических образцах в аэродинамической трубе в Милане [99, 107]. Также, учёными исследована возможность использования алгоритмов современных нейросетей для нахождения аэродинамического сопротивления поезда, сопоставляя данные, предложенные нейросетью с натурными экспериментами на физических моделях в аэродинамической трубе.

Ряд исследований, направленных на изучение влияния формы кузова подвижного состава на величину аэродинамического сопротивления, был выполнен в Великобритании. Для различных серий подвижного состава были выведены свои табличные коэффициенты увеличения сопротивления движению от воздушного потока [101].

1.4 Методики нормирования и анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов

1.4.1 Статистический метод обработки маршрутов машинистов с целью нормирования энергозатрат на тягу поездов

Нормирование энергозатрат на тягу поездов является одной из основных проблем экономии ресурсов на железнодорожном транспорте. Большое внимание уделяется различным методам и системам нормирования [57]. Эти методы могут быть классифицированы на расчётно-аналитические, расчётно-статистические и опытные.

Расчётно-аналитические методы предполагают либо выполнение тягового расчёта, либо подсчёт энергозатрат по энергобалансу. Тяговый расчёт даёт наиболее полную картину, но в нём трудно учесть все особенности режимов вождения поезда и действующее на него дополнительное сопротивление. Что касается балансовых методов, то все они отработаны при нормировании затрат на поездку. Но при вариации с учётом множества независимых факторов дают погрешность [80, 90].

К расчётно-статистическим относят те методы, у которых в качестве исходной базы данных принимают фактические энергозатраты за предыдущий период и далее проводят анализ, используя методы множественной корреляции.

К опытным методам можно отнести методы расчёта норм, которые используются в системе централизованной обработки данных маршрутов машинистов, а также опытные поездки совместно с машинистом-инструктором по теплотехнике.

Существует несколько расчётных методов определения расхода энергоресурсов.

Метод тягового расчёта применим для расчёта нормы на поездку методиками, рассмотренными в ПТР. Данный метод обладает довольно высокой точностью, однако он обладает существенными недостатками в виде изменчивости исходных данных, таких как: вес поезда, осевая нагрузка, а также в изменчивости режима движения [91].

Метод установившихся (равномерных) скоростей является приближенным методом определения нормы на поездку. Расходная норма рассчитывается как сумма расходов энергии за отрезки времени, соответствующие постоянному расходу и средней постоянной скорости движения в режиме тяги и расходу на собственные нужды на выбеге. Метод основан на предположении, что поезд движется по каждому элементу профиля с постоянной скоростью, и при переходе с одного элемента профиля на другой скорость меняется мгновенно. Данный метод является удобным для оценки энергоёмкости тягового плеча.

Метод эквивалентного уклона. Суть данного метода заключается в том, что реальный профиль на всём участке заменяется одним неизменным вдоль всего участка уклоном, на котором составляющие расхода энергии, зависящие от профиля пути равны сумме тех же составляющих при движении по реальному профилю. Данный метод обладает высокой погрешностью, составляющей примерно 10 % [80].

Метод В. С. Молярчука основан на расчёте энергозатрат по коэффициентам влияния. Суть этого метода заключается в приведении удельных расходов к первоначально известной базовой норме e_0 , определяемой по энергетическим паспортам локомотивов. При отклонении от базового варианта движения удельный расход ТЭР рассчитывается по следующей формуле [55]:

$$e = e_0 + k_a \Delta a + k_b \Delta b + k_c \Delta c, \quad (1.7)$$

где k_a , k_b , k_c – коэффициенты влияния, учитывающие реальные условия эксплуатации;

Δa , Δb , Δc – значения отклонений от основного варианта (изменения веса поезда, нагрузки на ось, технической скорости и прочее).

Данный метод довольно прост в реализации, однако у него есть свои недостатки: нужен начальный (базовый) вариант расчета и наименьшая погрешность получается при небольших отклонениях от начального варианта.

Метод энергетического баланса [69] основывается на законе сохранения энергии. Энергетический баланс движения поезда устанавливает количественное соответствие между суммарной выработанной энергией с одной стороны, и суммарной полезной энергией локомотива с другой стороны. Плюсом данного метода является снижение временных расходов на расчёты, но при этом данный метод также обладает высокой погрешностью [69].

Относительные методы основываются на расчёте начального варианта, для которого энергозатраты E_n известны. Тогда энергозатраты E на планируемый период рассчитывают по коэффициентам влияния, используя метод множественной корреляции [80]:

$$E = E_n(K_1\Phi_1 + K_2\Phi_2 + \dots + K_i\Phi_i), \quad (1.8)$$

где Φ_1, Φ_2, Φ_i – изменение нормообразующих факторов по отношению к начальному варианту;

K_1, K_2, K_i – коэффициенты влияния, определяемые путем статистического анализа данных эксплуатации.

Однако, у относительного метода есть три группы причин, которые могут вызвать ошибку:

– привязка данных нормирования к предыдущему периоду, при нормировании на новый период;

– коэффициенты влияния получены на основании линейной аппроксимации статистических данных при том, что эти материалы более точно аппроксимируются нелинейными зависимостями;

– функциональные зависимости не всегда могут быть выражены через средние значения.

Несмотря на все эти недостатки относительные методы могут быть использованы для целей прогнозирования энергозатрат на больших полигонах.

Абсолютный метод заключается в интегрировании статистических данных поездопотока. Данный метод позволяет уточнить результаты относительного метода, но является сложным и трудоемким для применения в локомотивных депо.

Статистические методы позволяют более полно учесть все особенности режимов движения поездов на рассматриваемом тяговом плече, а также изменения параметров поездопотоков.

Для обработки статистических данных в работе использовался статистический метод анализа маршрутов машинистов. Он необходим потому, что зачастую анализ расхода, основанный на аналитических методах тягового расчёта, бывает достаточно трудоёмким и не позволяет учитывать все условия эксплуатации в поездках на участках работы локомотивных бригад [77].

Задачами нормирования и статистической обработки маршрутов машинистов занимались ряд отечественных организаций, таких как: РУТ (МИИТ), ОмГУПС, ВНИИЖТ. Большой вклад по данной проблематике внесли следующие

учёные: А. А. Бакланов, В. С. Молярчук, Л. А. Мугинштейн, С. И. Осипов, Б. Г. Постол, В. Е. Розенфельд, Е. А. Сидорова, Н. Н. Сидорова, В. П. Феоктистов и другие [55, 58, 61, 69, 74, 76, 77, 90, 91].

Статистический метод помогает в первую очередь установить основные нормообразующие факторы и затем исследовать влияние этих факторов на энергозатраты (рисунок 1.8). Разработкой и совершенствованием данного статистического метода обработки маршрутов машинистов занимались учёные из РУТ (МИИТ) и (ОмГУПС) [76, 77]. В рамках выполняемых работ, были предложены методы нормирования расхода ТЭР на основе статистической обработки данных маршрутов машиниста. Анализ и нормирование расхода энергоресурсов при этом рассматривались как задачи корреляционно-регрессионного анализа с использованием методов парной или множественной корреляции, позволяющих оценивать влияние на удельный расход ТЭР не только одного случайно изменяющегося фактора при определённом уровне других, но и действие нескольких случайных факторов одновременно [80, 90].

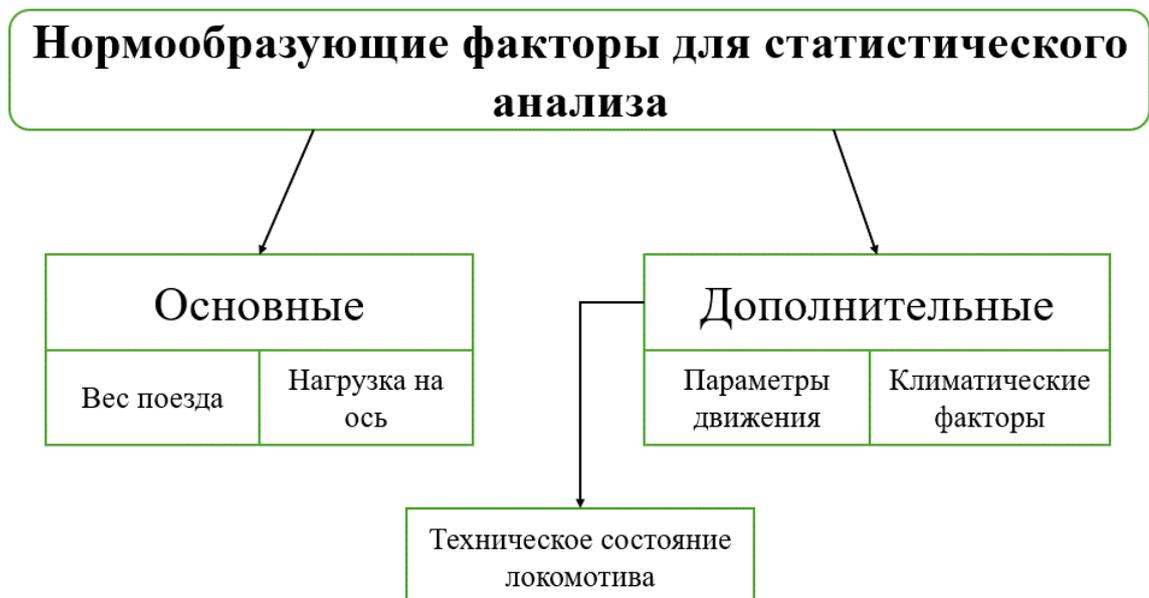


Рисунок 1.8 – факторы, влияющие на энергозатраты

В случае выявления зависимости одного фактора от нескольких других, уравнение регрессии имеет вид:

$$e = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \dots + \alpha_n x_n, \quad (1.9)$$

где e – средний удельный расход ТЭР, соответствующий заданным значениям выбранных факторов x_1, x_2, \dots, x_n ;

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты переменных уравнения множественной регрессии, определяющие значимость каждой переменной при расчёте итогового значения, которые последовательно определяются из систем уравнений с помощью метода наименьших квадратов.

Так, Н. Н. Сидоровой была предложена методика обработки маршрутов машинистов на основе построения и анализа гистограмм удельного расхода энергии, а также корреляционного анализа основных и нормообразующих факторов, влияющих на расход с целью установления норм потребления ТЭР, нахождения рациональных коэффициентов использования локомотивов, что позволило задавать объективную норму расхода ТЭР, рациональнее использовать тяговые ресурсы [90].

Данное направление получило продолжение в работах профессора ОмГУПС Е. А. Сидоровой, занимающейся совершенствованием интегрированной системы обработки маршрутов машинистов, применяющейся в локомотивных депо для снижения энергозатрат. Данная система автоматизировала процесс установления нормы расхода ТЭР на уровне локомотивных депо [76].

Статистическая обработка маршрутов машинистов помогает также в решении задач мониторинга технического состояния локомотива. Так, в своих работах В. И. Киселёв, И. И. Лакин прибегали к статистическому анализу маршрутов машинистов для оценки взаимосвязи загруженности в эксплуатации локомотивов, их тонно-километровой работе на надёжность [42].

Также статистическая обработка маршрутов машинистов помогает оценить энергоэффективность локомотивов [59].

**1.4.2 Инструкция ЦТ/2564 «По техническому нормированию
расхода электрической энергии и топлива
тепловозами на тягу поездов»**

Задача нормирования расхода электроэнергии и дизельного топлива на тягу поездов решалась, начиная с 1960-х годов, в 1967 году была введена в действие инструкция ЦТ/2564 «По техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов». Согласно данной инструкции, расчёт объёма топлива и электроэнергии, необходимых для функционирования железнодорожного транспорта, включает все расходы, связанные с перемещением составов и локомотивов, а также с обслуживанием локомотивов в процессе работы с поездом [92].

В реальных условиях эксплуатации расход энергии или топлива не соответствует значениям, указанным в энергетических паспортах. В связи с этим при расчёте норм расхода энергоресурсов используются корректирующие коэффициенты, которые учитывают реальные факторы, влияющие на движение.

К недостаткам данной инструкции следует отнести значительный разброс между перечисленными коэффициентами для разных серий локомотивов и выполняемой работы, что усложняет операции по установлению нормы расходы ТЭР. Средние значения коэффициентов представлены в соответствующих документах Министерства путей сообщения (МПС), однако в случае применения осреднённых коэффициентов снижается объективность нормирования. Также недостаток данной инструкции заключается в том, что среди всех корректирующих коэффициентов отсутствует коэффициент, позволяющий учесть влияние ветровых нагрузок.

1.4.3 Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов «ЦТД26»

Согласно данной методике, принятой в 1997 г, для анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов используются уравнение тягово-энергетического паспорта «осреднённого» локомотива и формулы тяговых расчётов. «Осреднённый» локомотив – это локомотив с основными характеристиками (мощность, коэффициент полезного действия (КПД) и т. д.), полученными путём осреднения по относительному объёму тонно-километровой работы показателей разных серий локомотивов, используемых в одном виде движения [52].

Нормы ТЭР устанавливаются в кВт·ч или килограммах условного топлива (КГУТ) для всех видов движения кроме маневрового. Для маневрового движения норма устанавливается в кВт·ч или КГУТ на 100 локомотиво-километров специальной маневровой работы.

Удельные нормы расхода топливно-энергетических ресурсов в грузовом и пассажирском железнодорожном движении определяются на основе расчёта по нормообразующим факторам, среди которых нет фактора влияния ветровых нагрузок, которые влияют на расход ТЭР. Состав этих факторов и коэффициенты их влияния определяются из уравнения, которое связано с тягово-энергетическим паспортом локомотива. Также данная методика учитывает изменение со временем структуры парка локомотивов, что может повлиять на расход ТЭР.

В других видах движения нормы определяются путём экстраполяции зависимостей, которые аппроксимируют фактические удельные расходы ТЭР за предыдущие периоды, на планируемый период. Это позволяет определить ожидаемые удельные нормы расхода ТЭР на планируемый период, учитывая тенденции, которые были выявлены по фактическим данным о расходе ТЭР за прошлые периоды.

1.4.4 Методика по инструкции № 512 и распоряжению № 962р ОАО «РЖД»

В настоящее время на сети ОАО «РЖД» используется методика нормирования ТЭР по инструкции № 512 от 26.12.2014 г., утверждённая распоряжением № 962р от 17.05.2019 г. Согласно этой инструкции, источником информации для нормирования являются данные централизованной системы обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) о выполненной работе, расходе ТЭР и значениях эксплуатационных факторов, представленные в информационном хранилище ОАО «РЖД» в разделе «Локомотивные парки» (ИХ ЛП) в форме ТХО-125 «Отчёт о расходе топлива или электроэнергии на тягу поездов» и в справках о выполнении показателей использования тягового подвижного состава (ТПС); данные автоматизированной системы управления нарушениями безопасности движения (АСУ НБД) о количестве задержек у запрещающего сигнала светофоров, о пропуске поезда по боковому пути станции и неграфиковых остановок; данные автоматизированной системы выдачи и отмены предупреждений (АСУВ0П-2) о количестве случаев проследования мест с ограничением скорости, данные метеослужбы о температуре атмосферного воздуха, количества и вида осадков [51, 65]. На основании этой информации проводится анализ маршрутов машинистов. Далее для каждого вида работы и серии локомотива устанавливается норма расхода с учётом влияния эксплуатационных факторов.

Как видно из обзора данных методик, среди всех многочисленных факторов, влияющих на норму расхода ТЭР, они не учитывают фактор наличия ветровых нагрузок.

1.5 Обоснование выбора участка для исследования

Согласно ГОСТ 16350-80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей» [17], территория Российской Федерации делится на 6 ветровых зон в зависимости от повторяемости ветров, дующих со скоростями свыше 12 м/с (рисунок 1.9; таблица 1.1).

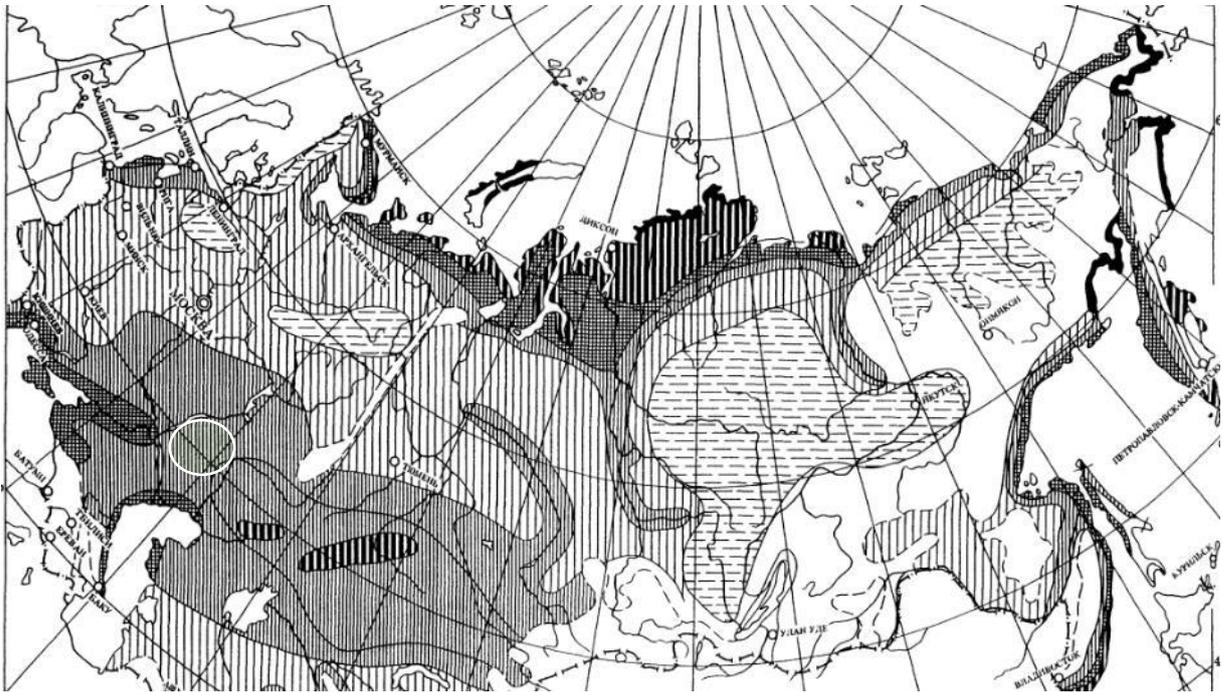


Рисунок 1.9 – Районирование территории СССР по повторяемости скорости ветра 12 м/с и более за октябрь – апрель по ГОСТ 16350-80

Таблица 1.1 – Характеристики ветровых районов страны по ГОСТ 16350-80 [17]

Номер зоны	Повторяемость ветра скоростью 12 м/с, % в году
1	Менее 1
2	1-5
3	5-10
4	10-15
5	15-20
6	Более 20

Для исследования был выбран участок Палласовка – Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги, относящийся к 4 ветровой зоне согласно ГОСТ 16350-80 [17]. На территории, на которой расположен данный участок, дуют ветра со скоростями 12 м/с и выше чаще, чем 53 дня в году (рисунок 1.9). Участок был выбран исходя из рельефа местности, погодных и климатических условий. Участок проходит с севера на юг (таблица 1.2) и расположен на равнинной (рисунок 1.10) степной, переходящей в полупустынную местность, что минимизирует влияние особенностей рельефа и направления ветра на расход ТЭР. Таким образом, направление ветрового потока, действующего на подвижной состав, практически на всём протяжении линии будет одинаковым, не подверженным влиянию рельефа местности, лесов и прочих аналогичных причин, способных значительно влиять на направленность и силу ветра [35].

Таблица 1.2 – Протяженность и координаты конечных точек участка

Название параметра	Значение параметра
Протяженность участка	203 км
Координаты населённого пункта Палласовка	50°03' с. ш. 46°53' в. д.
Координаты города Верхний Баскунчак	48°13' с. ш. 46°43' в. д.

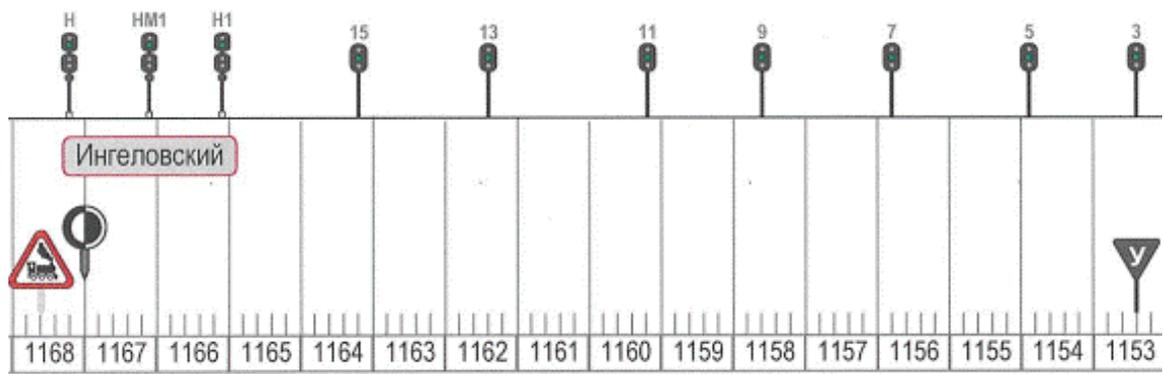


Рисунок 1.10 – Режимная карта участка

На рисунке 1.11 и в таблице 1.3 [64, 71, 75] и приведена информация о скорости и направлении ветра, зафиксированной в период с марта по май 2015 – 2020 года на метеостанции посёлка Эльтон, расположенной на исследуемом участке железной дороги, примерно на одинаковом удалении от конечных точек рассматриваемого маршрута. На розе ветров (рисунок 1.11) длина окрашенного сектора указывает на повторяемость направления ветра, а скорость ветра обозначается цветом окрашенного сектора (таблица 1.3).

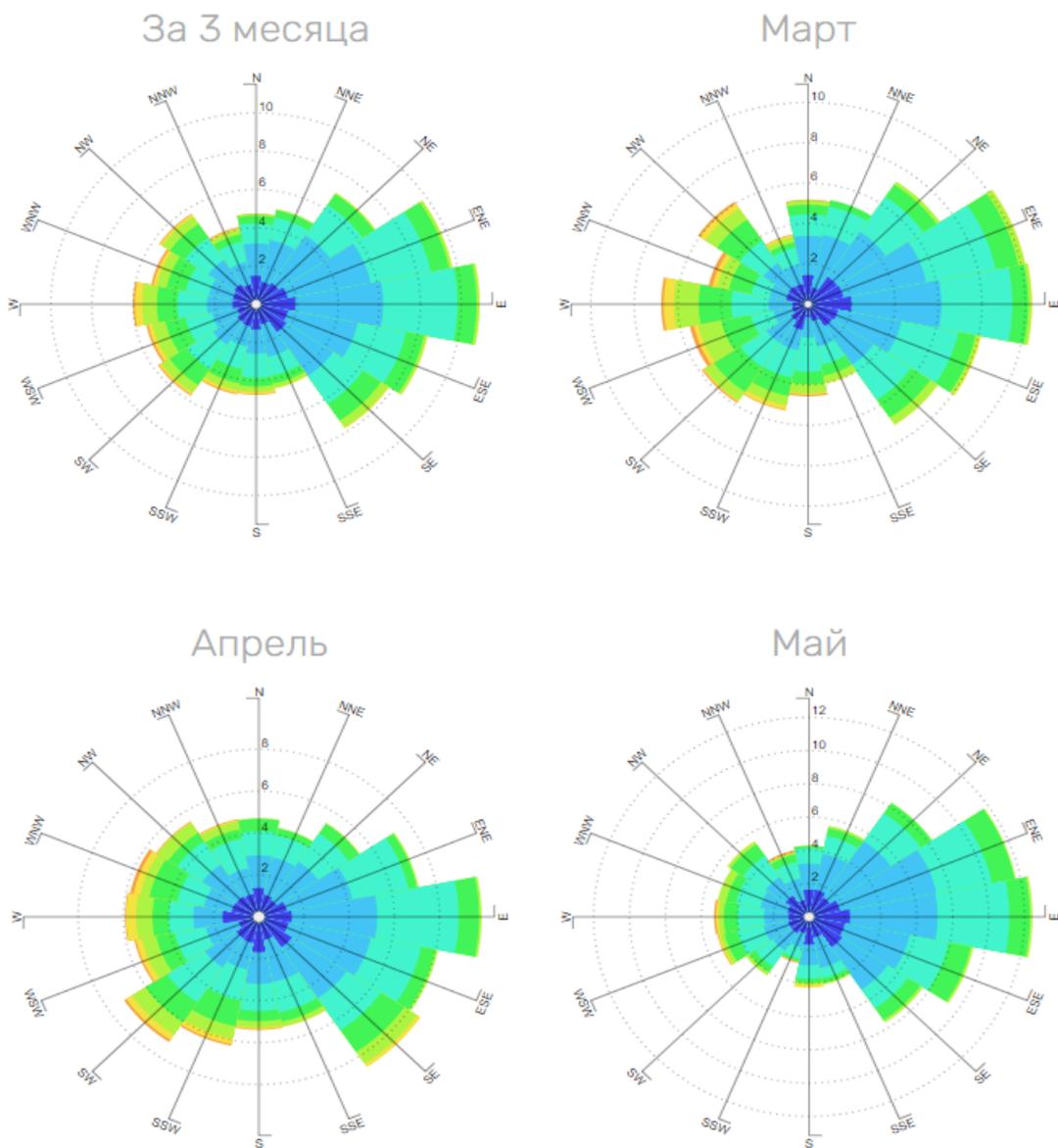
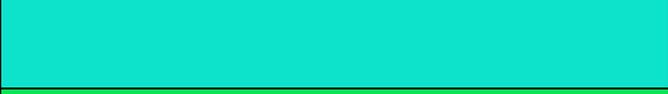
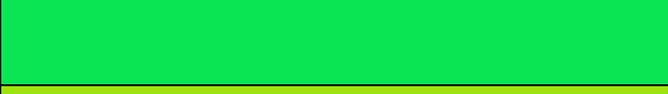


Рисунок 1.11 – Роза ветров метеостанции Эльтон

Таблица 1.3 – Обозначение секторов розы ветров

Скорость ветра, м/с	Цвет сектора
1 – 2	
3 – 4	
5 – 6	
7 – 8	
9 – 10	
11 – 12	
13+	

Согласно данным метеостанции, преобладает восточный ветер со средней скоростью 8 м/с.

Исследуемый участок Палласовка – Верхний Баскунчак обслуживают локомотивы и локомотивные бригады локомотивного депо «Ершов» Приволжской железной дороги. В данном локомотивном депо инженером по теплотехнике устанавливаются дополнительные корректирующие нормы расхода топлива в ветреную погоду на основе анализа статистической обработки машинистов, рапортов машинистов и данных опытных поездок по участку, сделанных в условиях значительных ветровых нагрузок.

1.6 Характеристики подвижного состава на исследуемом участке

Участок Палласовка – Верхний Баскунчак является однопутным, неэлектрифицированным. Основная тяговая единица на данном участке – магистральные тепловозы серии 2ТЭ25КМ (двухсекционный тепловоз с

электропередачей, мощностью 2500 кВт, с коллекторными тяговыми двигателями, модернизированный) приписки локомотивного депо «Ершов» Приволжской железной дороги (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Тепловоз 2ТЭ25КМ-0311 готовится к отправлению с грузовым поездом на станции Палласовка

Тепловоз серии 2ТЭ25КМ предназначен для грузового движения поездов на сети железных дорог Российской Федерации в умеренном климатическом поясе. Локомотив имеет электрическую передачу переменного-постоянного тока с поосным регулированием силы тяги [47].

Ниже представлены основные технические данные тепловоза серии 2ТЭ25КМ (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Основные технические данные тепловоза 2ТЭ25КМ

Наименование параметра	Величина параметра
Осевая (колёсная) формула	$2 \times (3_0 - 3_0)$
Число сцепных осей секции	6
Число секций	2
Служебная масса (при 2/3 запаса топлива и песка), т	$2 \times 144 \pm 3\%$
Касательная сила тяги при трогании с места, максимальная, кН (тс)	$2 \times 419,4, (2 \times 42,77)$
Касательная сила тяги длительного режима, кН (тс)	$2 \times 323,6 (2 \times 33)$
Скорость, м/с (км/ч):	
– конструкционная	27,8 (100)
– длительного режима	6,55 (23,6)
Ширина колеи, мм	1520
Длина по осям автосцепок, мм	2×20000
Наибольшая ширина, мм	3120
Высота от головки рельса по кузову, мм	5005
Габарит по ГОСТ 9238-2022 «Габариты железнодорожного подвижного состава» [16]	1-Т
Диаметр колес по кругу катания, мм	1050
Передаточное отношение редуктора	4,41
Полная мощность дизеля, кВт	2650
Выходная мощность ТЭД, кВт	366
Мощность мотор-вентиляторов охлаждения шахты холодильника, кВт	$4 \times 30 = 120$
Мощность мотор-вентилятор охлаждения ТЭД, кВт	$2 \times 45 = 90$
Мощность мотор-вентилятора охлаждения ВУ, кВт	7,5
Мощность электродвигателя компрессора, кВт	37

На тепловозе серии 2ТЭ25КМ установлена дизель-генераторная установка, состоящая из дизеля 16ЧН26/26 и генератора ГС501У2. Каждый цилиндр дизеля имеет свою топливную аппаратуру, которая состоит из топливного насоса, форсунки и трубопровода высокого давления. К форсункам топливо поступает по трубопроводу высокого давления из топливных насосов. Система подачи топлива в цилиндры регулируется электронной системой контроля числа оборотов дизеля (ЭРЧО), тем самым реализуя алгоритмы электронного впрыска топлива. Кузов тепловоза серии 2ТЭ25КМ вагонного типа и состоит из кабины машиниста, каркаса кабины машиниста, рамы, холодильной камеры, каркаса холодильной камеры, кузова над дизель-генератором и аппаратными камерами. Тележка тепловоза серии 2ТЭ25КМ – бесчелюстная с одноступенчатым рессорным подвешиванием, с рычажной передачей тормоза с двухсторонним нажатием тормозных колодок, опорно-осевой подвеской тяговых электродвигателей, пневматическим приводом тормоза для каждого колеса и поводковыми буксовыми узлами с осевыми упорами качения и опоры рамы.

Поездпоток на участке Палласовка – Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги в большинстве своём состоит из полувагонов для перевозки сыпучих грузов в кольцевых маршрутах к портам черноморского побережья и обратно в порожнем состоянии, поэтому в рассматриваемой работе по аэродинамике поезда модель состоит из локомотива 2ТЭ25КМ и полувагонов. Полувагон представляет собой универсальный железнодорожный грузовой вагон без крыши с высокими бортами. Полувагоны предназначены для перевозки навалочных и сыпучих грузов: руда, уголь, и т. п., а также контейнеров и других грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков. Технические характеристики одного из наиболее распространённых серий полувагона модели 12–119 представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Основные технические данные полувагона типа 12–119 [45]

Наименование параметра	Величина параметра
Грузоподъёмность, т	69
Масса тары вагона, т	22
Размеры вагона внутренние (длина / ширина / высота), мм	12068 / 2878 / 2060
Объём кузова, м ³	73
Площадь пола, м ²	35,4
Длина по осям автосцепок, мм	13920
Длина по концевым балкам рамы	12700
Максимальная высота от уровня головок рельсов, мм	3484
Высота от уровня головок рельсов до нижней обвязки, мм	1414

Полувагон является наиболее подверженной аэродинамическому воздействию единицей подвижного состава, ввиду наличия открытых полостей внутри кузова [45].

1.7 Выводы по первому разделу

1 Проанализированы результаты научных исследований в областях нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, аэродинамики подвижного состава и влияния ветров на движущийся поезд. Показано, что несмотря на значительный объём выполненных исследований в области аэродинамики железнодорожных поездов, вопрос влияния ветра на движущийся поезд в части расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу исследован недостаточно подробно, что подтверждается немногочисленностью исследований данной проблемы.

2 Проанализированы разработанные и действовавшие ранее, а также действующие в настоящее время нормативно-технические документы Министерства путей сообщения и ОАО «РЖД», посвящённые нормированию топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Отмечено, что среди множества эксплуатационных и нормообразующих факторов, влияющих на увеличение расхода ТЭР, в методиках не отражены факторы, учитывающие влияния ветровых нагрузок.

3 Проанализированы методы исследования аэродинамики поезда, а также влияния ветра на расход топливно-энергетических ресурсов. Показано, что наименее затратным методом исследования аэродинамики поездов являются методы имитационного моделирования, позволяющие выполнять исследования для подвижного состава произвольной конструкции при любых начальных условиях, в том числе, недостижимых в условиях реальной эксплуатации. Вместе с этим результаты исследований на моделях должны быть верифицированы по результатам эксперимента.

4 Выполнен анализ географических районов страны, различным климатическим районам соотнесены различные участки железных дорог России. Показано, что наиболее оптимальным для выполнения исследований по оценке влияния ветра на расход топливно-энергетических ресурсов является участок Приволжской железной дороги, расположенный в ветрозависимом районе, и характеризующийся сочетанием следующих географических особенностей, таких как: равнинная открытая местность и локализация конечных точек маршрута на одной долготе, позволяющих минимизировать влияние других, кроме ветра, факторов на расход топлива.

2 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАРШРУТОВ МАШИНИСТОВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА РАСХОД ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

2.1 Методика сбора и обработки статистической информации

Для сбора статистических данных о расходе дизельного топлива на тягу поездов была использована централизованная система обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) ОАО «РЖД» [51, 80], которая содержит полную базу электронных маршрутов машинистов. Была собрана выборка маршрутов машинистов из локомотивного депо ТЧЭ-13 Ершов Приволжской ж. д., работающих на участках Палласовка – Верхний Баскунчак и Верхний Баскунчак – Палласовка на тепловозах 2ТЭ25КМ. Данные были взяты с таким условием, чтобы исключить или пренебречь влиянием на удельный расход топлива температуры атмосферного воздуха. Поэтому, были взяты данные за период с октября по декабрь 2020 года и с марта по май 2021 года. Средняя температура в этих месяцах варьируется в диапазоне от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом исключается влияние на расход топлива влияние высоких и низких температур.

Необходимо отметить, что при размещении информации на ресурсе ЦОММ учитывают ветровые воздействия за поездку, для чего используют данные метеостанции и рапорты машиниста (графа «Замечания», из электронного маршрута машиниста).

Обработка собранных данных проводилась следующим образом. На первом этапе из исходной совокупности выбраковывались те значения расхода, которые являются явно искажёнными (например, околонулевые значения или значения, многократно превышающие обычные показатели, полученные в процессе ошибочного ввода данных в систему). На следующем этапе проводилась оценка принадлежности элементов выборки генеральной совокупности.

Для выбора метода данной проверки предварительно выполнялась оценка числовых характеристик распределения: математического ожидания, среднего квадратического отклонения, дисперсии, асимметрии, эксцесса – по известной методике [36, 91], рассмотренной в первом разделе:

– математическое ожидание \bar{x} выборки удельного расхода топлива:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}, \quad (2.1)$$

где x_i – случайное значение в выборке;

N – сумма значений чисел в выборке;

– среднеквадратическое отклонение σ выборки удельного расхода топлива:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}}; \quad (2.2)$$

– дисперсия D выборки удельного расхода топлива:

$$D = \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}; \quad (2.3)$$

– асимметрия As выборки удельного расхода топлива:

$$As = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3}; \quad (2.4)$$

– эксцесс Ex выборки удельного расхода топлива:

$$Ex = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} - 3. \quad (2.5)$$

Также были определены значения квартилей: первого, второго (медиана) и третьего. Квартили – это значения, которые делят упорядоченную выборку на четыре равные части. Различают первый квартиль (Q_1), второй (Q_2 – это медиана) и третий (Q_3). Первый квартиль – это такое значение, меньше которого будет 25 % значений выборки, а 75 % будут больше. Q_2 является медианой и делит распределение пополам. Q_3 (третий квартиль) – это значение, больше которого будет 25 % наблюдений. Данные значения были найдены по формулам (2.6–2.8) [18, 43]:

– медиана:

$$Q_2 = x_{nQ_2} + i_{Q_2} \cdot \frac{0,5 \cdot \sum x_i - S_{Q_2-1}}{f_{Q_2}}, \quad (2.6)$$

– первый квартиль:

$$Q_1 = x_{nQ_1} + i_{Q_1} \cdot \frac{0,25 \cdot \sum x_i - S_{Q_1-1}}{f_{Q_1}}, \quad (2.7)$$

– третий квартиль:

$$Q_3 = x_{nQ_3} + i_{Q_3} \cdot \frac{0,75 \cdot \sum x_i - S_{Q_3-1}}{f_{Q_3}}, \quad (2.8)$$

где x_{nQ_i} – нижняя граница квартильного интервала;

i_{Q_i} – величина квартильного интервала;

$\sum x_i$ – общее число единиц совокупности;

S_{Q_i-1} – накопленная частота до квартильного интервала;

f_{Q_i} – частота квартильного интервала.

Результаты вычислений всех математических характеристик выборки представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты вычисления статистических характеристик

Наименование параметра	Значение
Математическое ожидание (\tilde{x})	22,95
Среднее квадратическое отклонение σ	9,77
Дисперсия (D)	95,39
Асимметрия (As)	1,08
Эксцесс (Ex)	1,3
Количество значений (n)	488
Минимум (min)	2,42
Максимум (max)	73,8
Нижний квартиль (Q_1)	15,2
Медиана (Q_2)	19,98
Верхний квартиль (Q_3)	28,81

Для выбраковки большого объёма статистических данных удельного расхода топлива с целью определения величин, имеющих искажённое значение был использован метод межквартильных интервалов [18].

Межквартильным интервалом ($Q_3 - Q_1$) (рисунок 2.1) называется разность между третьим и первым квартилями распределения ответов [18].

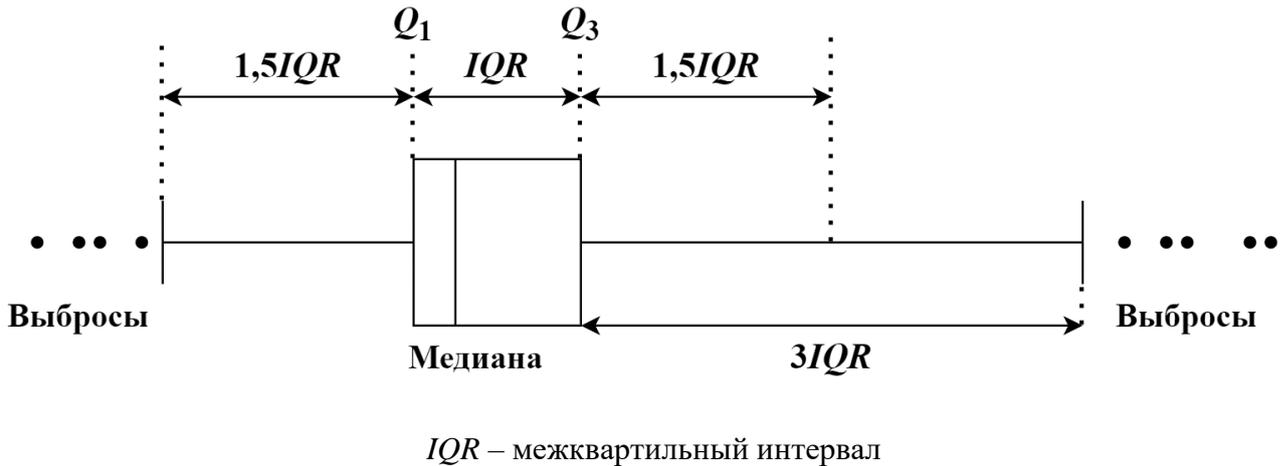


Рисунок 2.1 – Распределение квартилей в выборке данных

При использовании метода межквартильных интервалов под экстремальными значениями, подлежащими выбраковке, принимают значение случайной величины, лежащие вне прямоугольника: рисунок 2.1 (вправо или влево) на расстоянии большем, чем три межквартильных интервала. Под выбросами подразумевают значения случайной величины, выходящие за пределы прямоугольника (вправо или влево) более чем на полтора, но менее чем на три межквартильных расстояния [18].

Минимальное значение из выборки, подлежащее выбраковке найдено по формуле 2.9:

$$X_{min} = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1). \quad (2.9)$$

Подставив ранее найденные значения, получим:

$$X_{min} = 15,2 - 1,5 \cdot (28,81 - 15,2) = -5,2 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}.$$

Полученное значение нижней границы выбраковки, предполагающее отрицательное значение не имеет физического смысла, так как расход топлива не может быть отрицательным, также он не может быть около нулевым. Поэтому, в данной работе в качестве нижней границы критерия выбраковки было принято значение $11,2 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто на основании нижней границы преобладающего числа значений, по которому проводилась выбраковка элементов выборки.

Максимальное значение рассчитывается по формуле 2.10 на расстоянии трёх межквартильных интервалов, так как для анализа необходимы экстремальные значения из выборки [43]:

$$X_{max} = Q_3 + 3 \cdot (Q_3 - Q_1); \quad (2.10)$$

$$X_{max} = 28,81 + 3 \cdot (28,81 - 15,2) = 69,6 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}.$$

На рисунке 2.2 приведена гистограмма плотности распределения f удельного расхода топлива e , построенная по обработанным данным из маршрутов машинистов.

Как видно, гистограмма положительно асимметричная, имея более пологую правую часть, соответствующую большим значениям расхода топлива. Одной из причин этого может быть наличие ветровых нагрузок.

Число интервалов K , в представленных далее гистограммах, выбрано по правилу Старджесса [14]:

$$K = 3,3 \cdot \lg N + 1 \leq 25. \quad (2.11)$$

После отбраковки экстремальных значений проведён анализ характеристик поездопотока, которые ещё могут оказывать влияние на увеличение удельного расхода ТЭР. Характеристики потока поездов на исследуемом плече, оказывающие влияние на затраты дизельного топлива, во многом зависят от разбросов фактических значений весов поездов Q , их осевых нагрузок q , среднетехнических скоростей $v_{\text{тех}}$, количества остановок N_0 в каждой поездке [27].

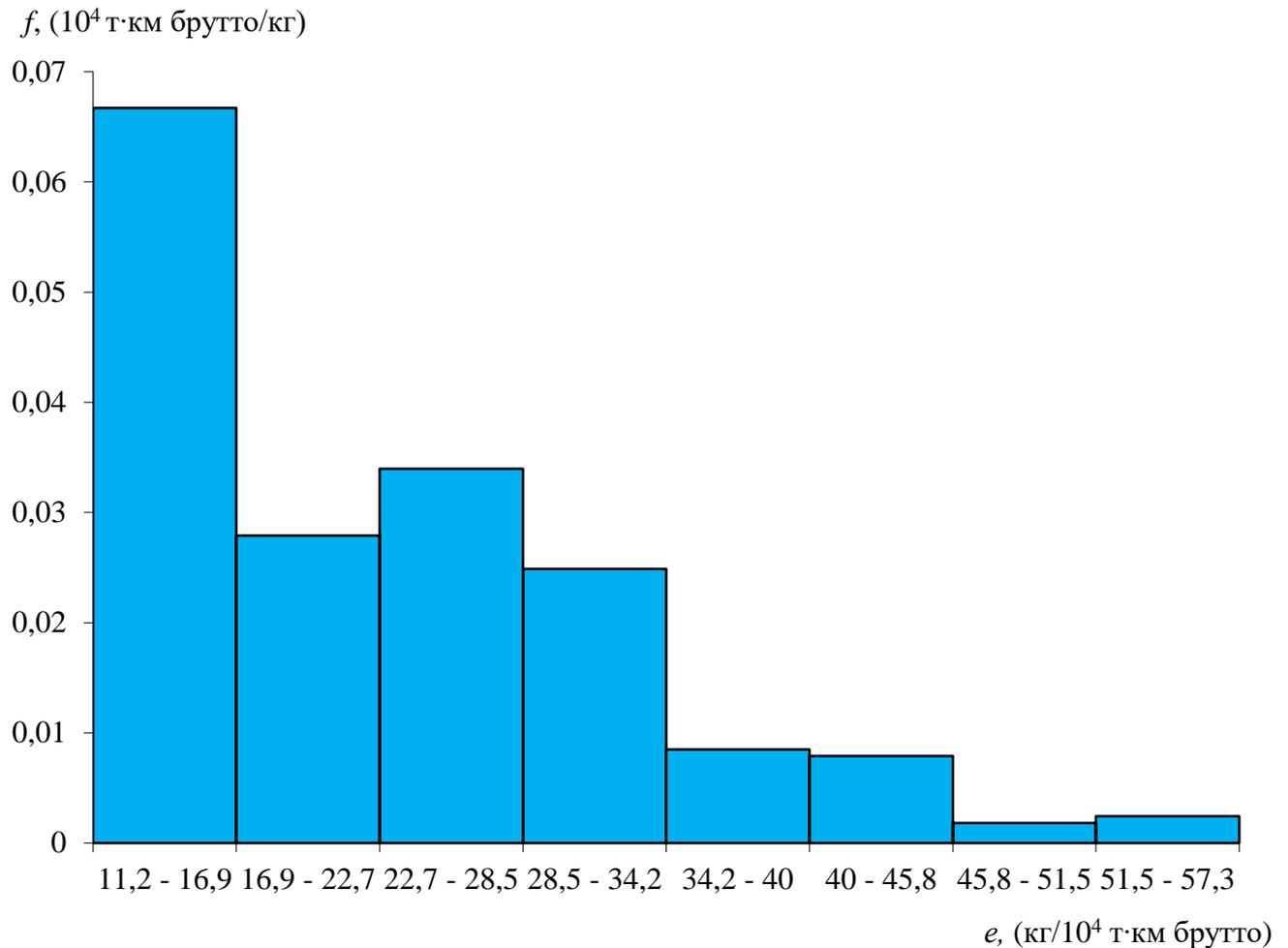


Рисунок 2.2 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозами при работе на участке Палласовка – Верхний Баскунчак

Линия Палласовка – Верхний Баскунчак является однопутной со средней интенсивностью движения (согласно Правил технической эксплуатации ж. д.) около 20 пар поездов в сутки. Движение на однопутной линии с большой вероятностью предусматривает остановки поездов для обгона или скрещения, при этом количество остановок значительно влияет на расход топлива, повышая его. Соответственно, для рассматриваемого поездопотока количество остановок является дополнительным нормообразующим фактором, влияющим на расход энергии, который уже заранее входит в норму расхода ТЭР за поездку. На рисунке 2.3 представлена зависимость удельного расхода топлива от количества остановок для порожних поездов (поездов с фиксированной минимальной

нагрузкой). Как видно из рисунка 2.3, с увеличением числа остановок возрастает и удельный расход топлива [91]. Данные достовернее всего аппроксимируется экспоненциальным законом по методу наименьших квадратов.

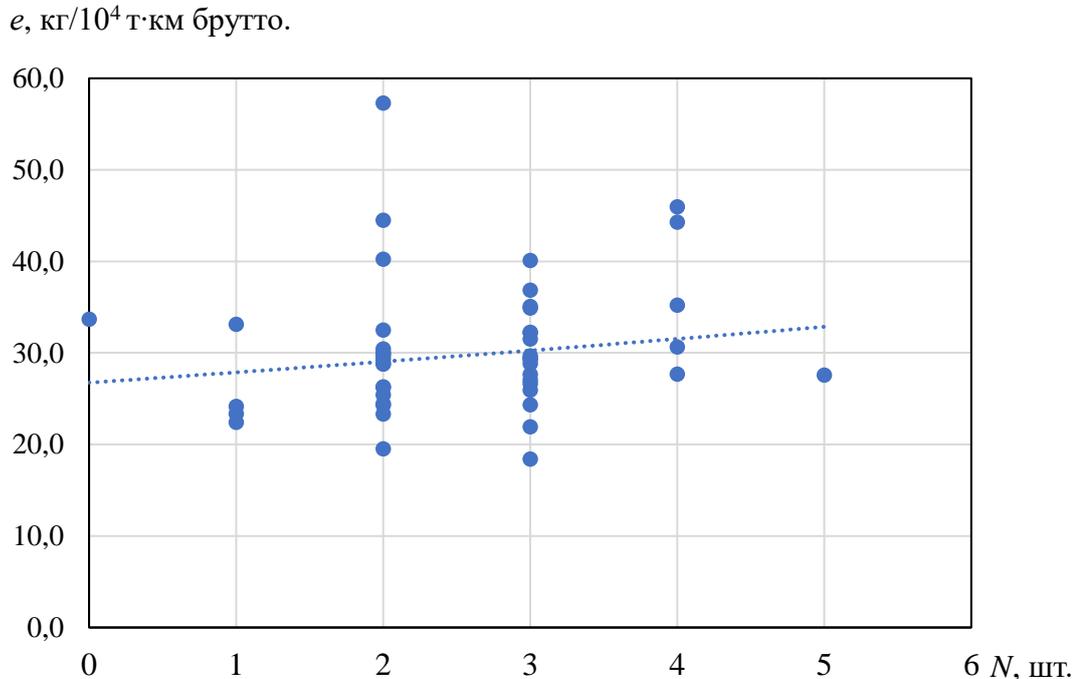


Рисунок 2.3 – Зависимость удельного расхода топлива от количества остановок на участке Палласовка – Верхней Баскунчак для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось

Уравнение аппроксимации имеет следующий вид: $y = 26,75e^{0,0411x}$.

Проведенный статистический анализ показывает, что и для поездов с фиксированной максимальной нагрузкой на ось гружёных поездов количество остановок, а, следовательно, и среднетехническая скорость должна включаться в качестве дополнительного нормообразующего фактора в каждой поездке при определении норм расхода ТЭР (рисунок 2.4). Из рисунка 2.4 для гружёных так же, как и для порожних поездов видно, что с увеличением числа остановок увеличивается и удельный расход топлива. Данные достовернее всего аппроксимируется экспоненциальным законом по методу наименьших квадратов.

Уравнение аппроксимации имеет следующий вид: $y = 14,73e^{0,0166x}$.

Также можно сделать вывод о том, что гружёные составы с фиксированной максимальной нагрузкой демонстрируют меньший прирост расхода топлива при увеличении неблагоприятных условий, таких как частые остановки или ветровые нагрузки. Это объясняется лучшей эффективностью использования мощности тепловоза и меньшими величинами удельных сопротивлений движению по сравнению с порожними поездами.

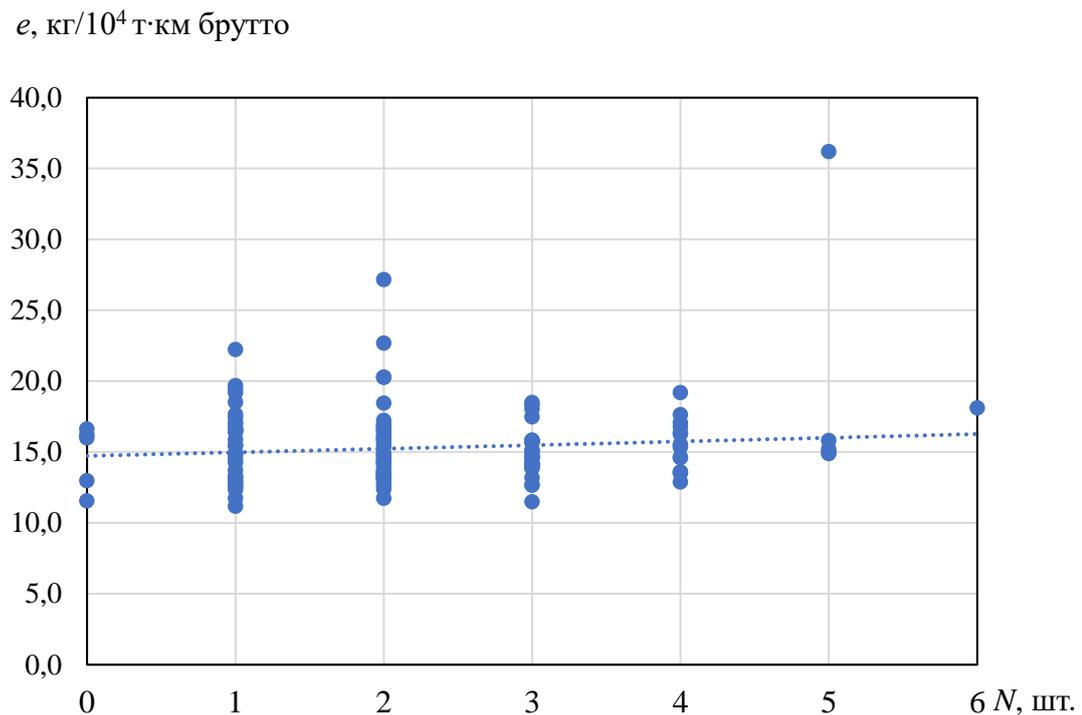
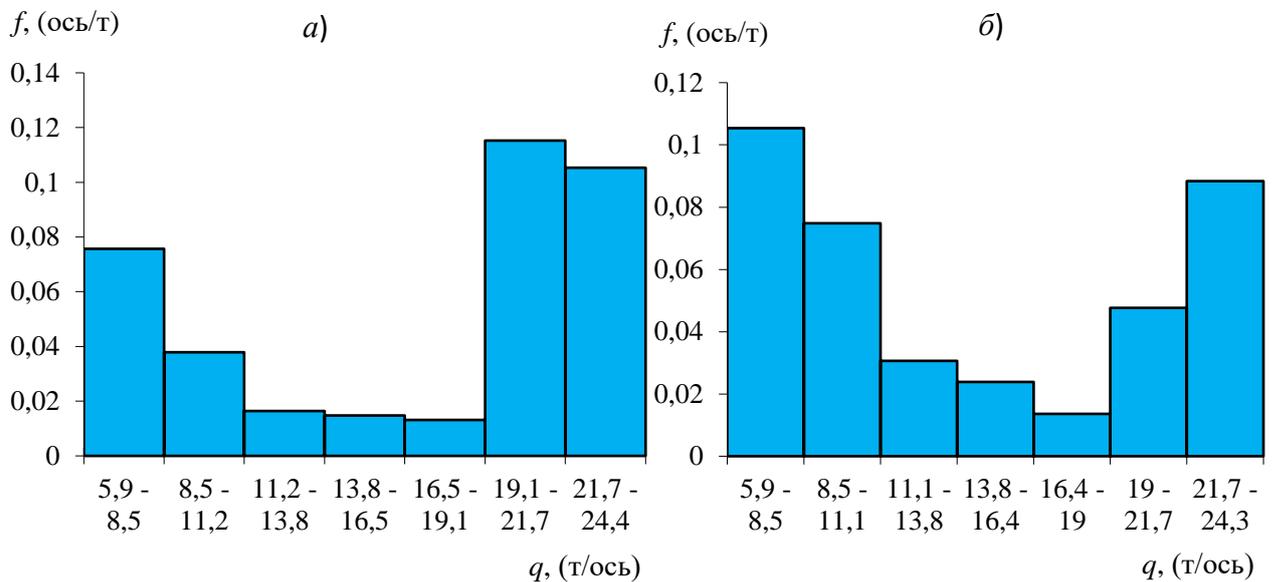


Рисунок 2.4 – Зависимость удельного расхода топлива от количества остановок на участке Палласовка – Верхней Баскунчак для поездов с фиксированной максимальной нагрузкой на ось

Подобные различия подчёркивают важность комплексного подхода при нормировании энергозатрат с учётом характеристик состава и эксплуатационных условий.

2.2 Анализ влияния на расход топливно-энергетических ресурсов среднего значения осевой нагрузки в поезде

На основе данных маршрутных листов машинистов были построены гистограммы плотности распределения нагрузки на ось (рисунок 2.5, а, б) и удельного расхода топлива для «чётного» и «нечётного» направлений рассматриваемого участка.



а – для участка Палласовка – Верхний Баскунчак; б – обратно

Рисунок 2.5 – Гистограммы плотности распределения нагрузки на ось

Как видно, обе гистограммы являются бимодальными, причём обе моды на обеих гистограммах соответствуют порожним ($q = 7,5$ т/ось) и гружёным поездам ($q = 22,5$ т/ось), то есть грузопоток в обоих направлениях в большинстве случаев включает в себя либо полностью порожние, либо гружёные поезда. Поэтому, для исследования возможности объединения выборок для повышения достоверности результатов анализа за счёт увеличения размера выборки, была выполнена проверка однородности данных выборок с использованием универсального метода Вилкоксона. Суть этого критерия для двух независимых выборок объемом n_1 и n_2 ,

при этом $n_1 < n_2$, заключается в том, что если выполняется условие неравенства $W_{\text{набл}} < w_{\text{верхн.кр.}}$, то выборки можно считать однородными. $W_{\text{набл}}$ – сумма порядковых номеров первой выборки в объединённой выборке, расположенной по возрастанию [14].

Последовательность выполнения проверки принята следующая. Вначале были вычислены нижняя и верхняя критическая точки выборок:

$$w_{\text{нижн.кр.}} = \left(\frac{(n_1 + n_2)n_1 - 1}{2} - z_{\text{кр}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \right), \quad (2.12)$$

где $z_{\text{кр}}$ – коэффициент из таблицы функции Лапласа при уровне значимости $p = 0,01$ для инженерных расчетов [14].

$$w_{\text{верхн.кр.}} = (n_1 + n_2 + 1)n_1 - w_{\text{нижн.кр.}}, \quad (2.13)$$

где n_1 – объём выборки для направления Палласовка – Верхний Баскунчак;

n_2 – объём выборки для направления Верхний Баскунчак – Палласовка.

В результате выполненных вычислений получены следующие значения нижней и верхней критических точек выборок и суммы порядковых номеров первой выборки: $w_{\text{нижн.кр.}} = 3024$; $w_{\text{верхн.кр.}} = 4144$; $W_{\text{набл}} = 3804$. $W_{\text{набл}} < w_{\text{верхн.кр.}}$ – гипотеза подтверждена. Следовательно, выборки однородны и могут быть объединены.

На рисунке 2.6 представлена обобщённая гистограмма плотности распределения нагрузки на ось, построенная с использованием объединённой для обоих направлений выборки. Как видно, характер гистограммы на рисунке 2.6 не изменился по сравнению с гистограммами на рисунке 2.5, а, б, она по-прежнему является бимодальной с модами, соответствующими порожним и гружёным поездам.

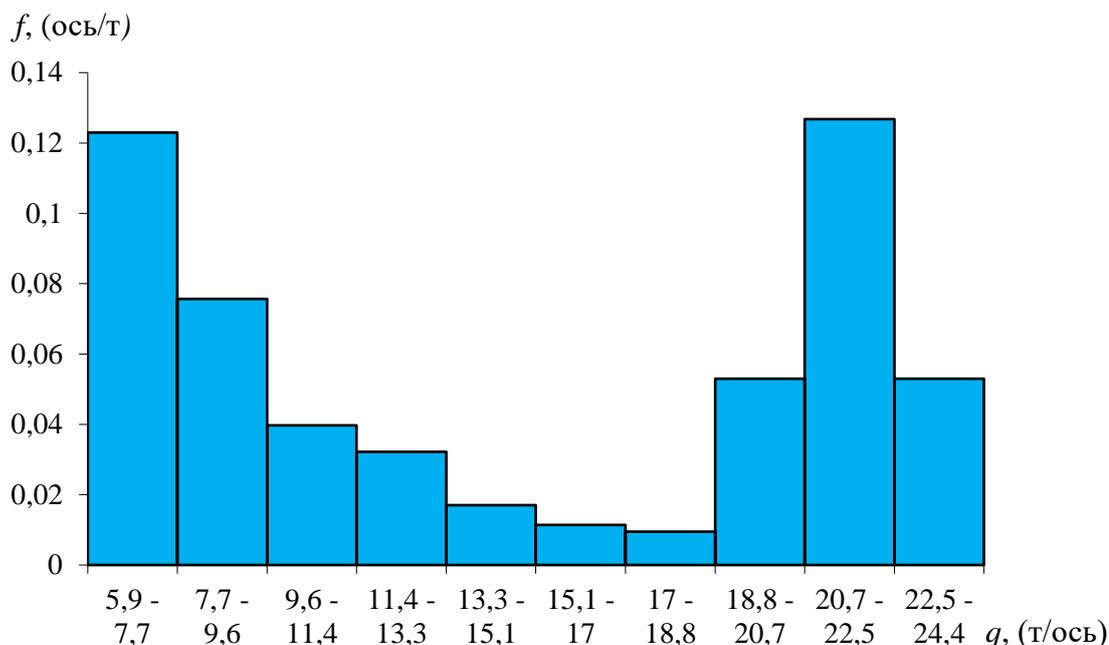


Рисунок 2.6 – Гистограмма плотности распределения нагрузки на ось грузовых поездов на рассматриваемом участке

Нагрузка на ось является основным нормообразующим фактором, от которого зависит удельный расход топлива. Поэтому, при определении дополнительных факторов, влияющих на расход, был выполнен анализ для условий движения с постоянной осевой нагрузкой. Для этого из исходной выборки были выделены частные выборки удельного расхода топлива из маршрутов для поездов, осевая нагрузка которых соответствует столбцам с наибольшей плотностью распределения, а именно крайнему левому столбцу, а также предпоследнему правому столбцу гистограммы [77].

Как отмечалось ранее, участок Палласовка – Верхний Баскунчак является равнинным, пролегающим в условиях степи, с минимальным перепадом высот вдоль трассы. Поэтому была выдвинута гипотеза о возможности объединения данных частных выборок, для чего также была проверена их однородность с использованием рассмотренного ранее метода Вилкоксона [14].

2.3 Анализ гистограмм удельного расхода топлива

Таким образом для исследования возможности объединения выборок с целью повышения достоверности результатов анализа за счёт увеличения количества данных, были проанализированы четыре независимые выборки:

1 удельного расхода топлива на участке Палласовка – Верхний Баскунчак с фиксированной минимальной нагрузкой на ось;

2 удельного расхода топлива на участке Верхний Баскунчак – Палласовка с фиксированной минимальной нагрузкой на ось;

3 удельного расхода топлива на участке Палласовка – Верхний Баскунчак с фиксированной максимальной нагрузкой на ось;

4 удельного расхода топлива на участке Верхний Баскунчак – Палласовка с фиксированной максимальной нагрузкой на ось.

В результате обработки выборок по формулам (2.12 и 2.13) получены следующие значения верхних критических точек и суммы порядковых номеров: $w_{\text{верхн.кр.1}} = 4144$; $W_{\text{набл}} = 3804$ для порожних поездов; $w_{\text{верхн.кр.1}} = 2059$; $W_{\text{набл}} = 1545$ для гружёных поездов. Во всех случаях получено, что $W_{\text{набл}} < w_{\text{верхн.кр.}}$ поэтому гипотезу об однородности выборок можно принять и в дальнейшем оперировать уже обобщёнными выборками. Гистограммы рассмотренных частных выборок представлены в приложении А.

Результаты выполненного статистического анализа по объединению выборок удельного расхода топлива представлены в таблице 2.2 для двухсекционных тепловозов 2ТЭ25КМ и поездов с фиксированной минимальной (2000 т) и максимальной (6000 т) нагрузкой на ось соответственно.

Для анализа влияния ветровых нагрузок из обобщённых выборок были выделены элементы, отмеченные как соответствующие неблагоприятным погодным условиям в виде сильного ветра. В таблицах 2.3 и 2.4 представлены числовые характеристики объединённых выборок для обоих направлений для порожних и гружёных поездов при наличии и отсутствии ветровых нагрузок.

Таблица 2.2 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т и 6000 т на участке Палласовка – Верхний Баскунчак в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

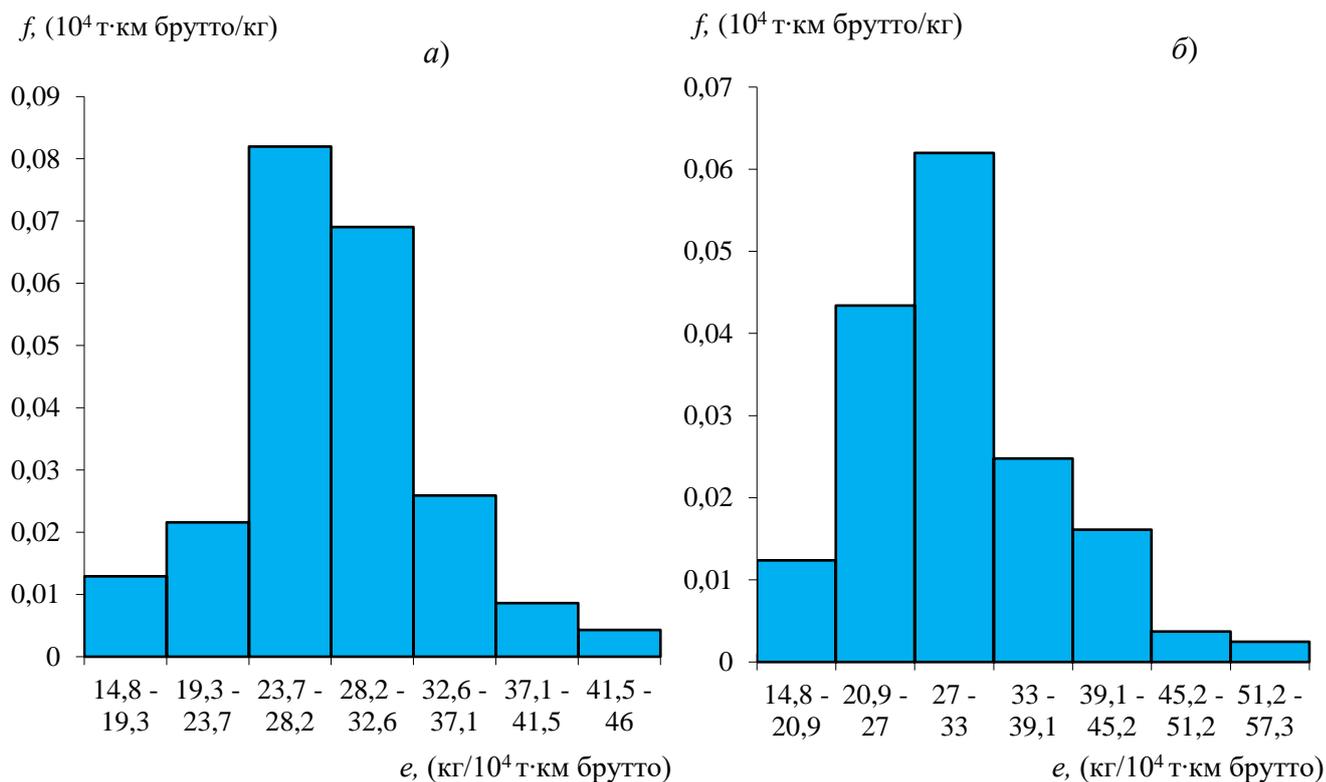
Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений				
	N	\bar{x}	σ	min	max
Удельный расход топлива для поездов массой 2000 т e , кг/изм	236	30,01	7,1	14,8	57,3
Удельный расход топлива для поездов массой 6000 т e , кг/изм	250	15,5	2,3	11,2	22,9

Таблица 2.3 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т при наличии и отсутствии ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений								
	n	\tilde{x}	$\sqrt{\sigma}$	min	max	σ	As	Ex	$Median$
Удельный расход топлива при отсутствии ветра e , кг/изм	104	28,3	5,44	14,8	46	29,58	0,33	0,98	27,9
Удельный расход топлива при наличии ветра e , кг/изм	132	32,2	7,4	14,8	57,3	51,6	0,61	0,73	28,85

На рисунках 2.7, 2.8 представлены объединённые гистограммы плотности распределения удельного расхода топлива. Как видно из представленных результатов, отмечается существенное увеличение величины удельного расхода топлива при наличии ветровых нагрузок. Это отмечено как при анализе частных выборок, так и при анализе общей выборки с фиксированной минимальной нагрузкой на ось. Так, применительно к общей выборке, максимальное значение удельного расхода возросло с 46 кг/10⁴ т·км брутто до 57,3 кг/10⁴ т·км брутто при наличии ветровых нагрузок.

Среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 6,5 %. Медианное значение выборки, соответствующей наличию ветровых нагрузок, увеличилось на 3,4 %. Также увеличилась величина асимметрии распределения вследствие более пологой ниспадающей части кривой плотности распределения.



а – без ветра; б – с ветром

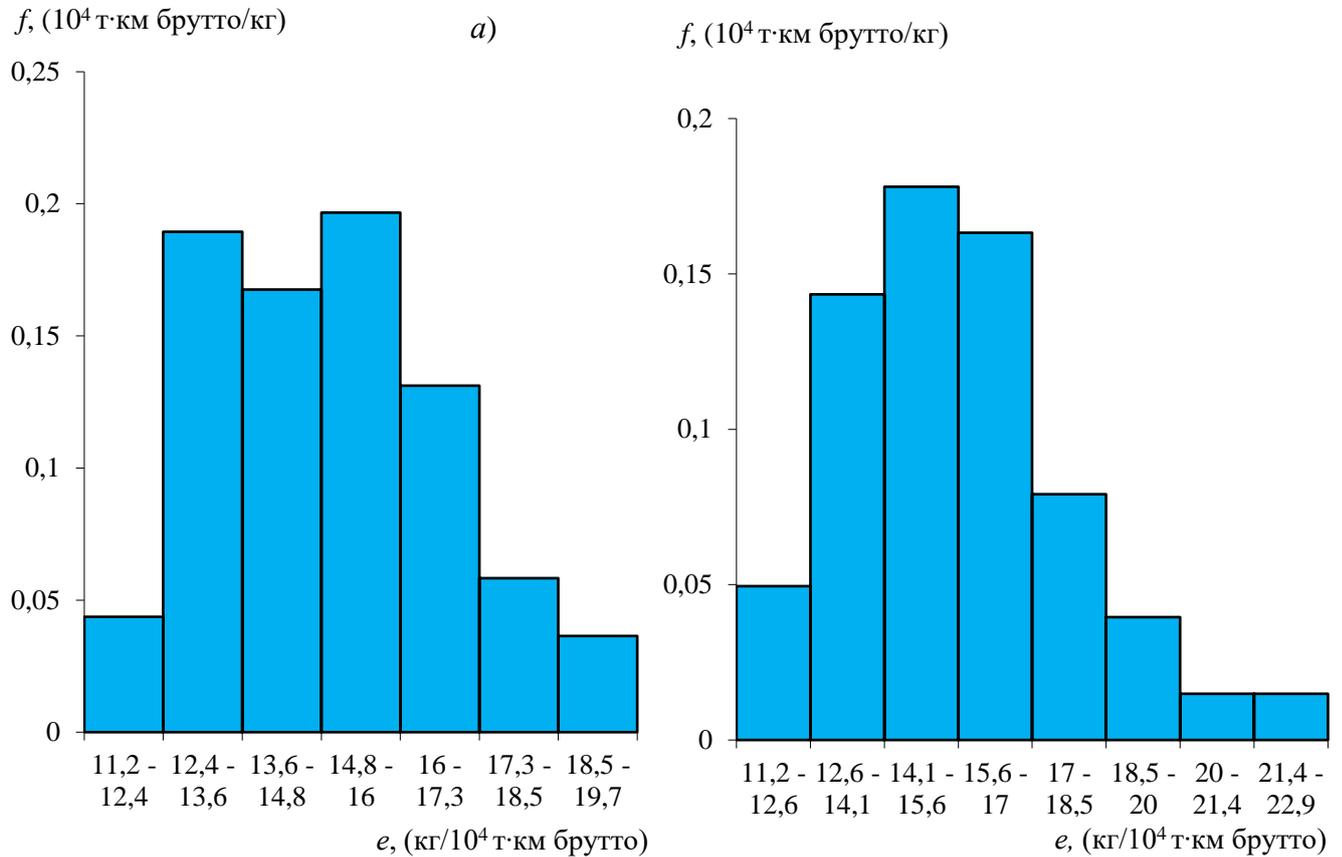
Рисунок 2.7 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ для общей выборки и для фиксированной минимальной нагрузки на ось

Получена бóльшая разница в значениях дисперсии. При этом величина дисперсии для выборки с присутствием ветровых нагрузок значительно выше, чем у выборки без ветровых нагрузок (51,6 против 29,58 соответственно). Значения эксцесса, также различаются для выборок, подобранных для случаев отсутствия и наличия ветровых нагрузок. Выборка без ветровых нагрузок является более островершинной.

Таким образом, как видно из полученных результатов наличие ветровых нагрузок значительно изменяет величину и характер зависимости удельного расхода топлива от основных эксплуатационных факторов.

Аналогичный статистический анализ был проведен и для поездов с фиксированной максимальной нагрузкой на ось на данном участке. Данные маршрутов машинистов в оба направления были объединены в одну обобщенную

выборку согласно критерию однородности [36]. Полученные гистограммы распределения удельного расхода топлива представлены на рисунках 2.8. А их числовые характеристики в таблице 2.4.



а – без ветра; б – с ветром

Рисунок 2.8 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ для общей выборки и для фиксированной максимальной нагрузки на ось

Таблица 2.4 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т при наличии и отсутствии ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений								
	n	\tilde{x}	$\sqrt{\sigma}$	min	max	σ	As	Ex	$Median$
Удельный расход топлива при отсутствии ветра e , $\text{кг}/\text{изм}$	113	15,02	1,88	11,2	19,7	3,54	0,29	-0,37	14,9
Удельный расход топлива при наличии ветра e , $\text{кг}/\text{изм}$	137	15,5	2,31	11,2	22,9	5,31	0,75	0,73	15,37

В результате анализа, по сравнению со случаем для порожних поездов, заметны меньшие средние, максимальные и минимальные значения удельного расхода топлива, как в выборках без наличия ветровой нагрузки, так и с наличием. Причинами этого является то, что при ведении поездов с весами, близкими к критическим значениям для тепловоза на данном участке, рациональнее используется его эффективная мощность, и кроме этого, значительно меньше силы удельного сопротивления движению поезда, так как ряд составляющих этих сил зависит от массы поезда.

В полученных гистограммах для поездов с фиксированной максимальной нагрузкой на ось также отмечается увеличение средней величины удельного расхода топлива при наличии ветровых нагрузок. Это видно как в частных выборках, так и в общей выборке с фиксированной максимальной нагрузкой на ось. В общей выборке видно, что максимальное значение возросло при наличии ветровых нагрузок. Среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 3,4 %. Медианное значение выборки, соответствующей наличию ветровых нагрузок, увеличилось на 3,2 %. Также заметно увеличение асимметрии вследствие более пологой ниспадающей части распределения. Как видно из выборки с фиксированной максимальной нагрузкой на ось при наличии ветровой нагрузки, увеличивается значение дисперсии, что подчёркивает разброс значений удельного расхода топлива при появлении ветровых нагрузок. Однако, прирост оказывается меньшим, чем для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось. Это ещё раз подтверждает большее влияние ветра на порожние поезда. Значение эксцесса для поездов без влияния ветровых нагрузок имеет отрицательное значение, что характерно для выборок грузёного распределения, где значения удельного расхода топлива имеют минимальные значения и незначительно отклоняются от среднего [28].

Анализируя две полученные независимые выборки для поездов с фиксированной минимальной и максимальной нагрузкой на ось видно, что под воздействием ветровых нагрузок среднее значение удельного расхода топлива больше возросло для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось на

6,3 % против 3,4 %. Это объясняется тем, что поезда большей массы имеют меньшее значение удельного расхода топлива. Немаловажным является и то, что на порожние поезда оказывается большее сопротивление движению, в частности от ветра [108].

2.4 Выводы по второму разделу

1 Выполнен статистический анализ данных о расходе топлива локомотивами, обслуживающими выбранный участок. В результате подтверждено влияние ветровой нагрузки на расход топливно-энергетических ресурсов. Показано, что при наличии ветра увеличиваются среднее выборочное и медианное значение величины расхода топлива, также возрастает асимметрия распределения в результате увеличения количества значений в выборке, относящихся к большим значениям расхода топлива.

2 Проанализированы статистические методы, используемые для проверки принадлежности элементов выборки генеральной совокупности, а также для проверки однородности выборок. При решении рассматриваемой задачи удобно использовать метод межквартильных интервалов, а для проверки однородности выборок – метод Вилкоксона.

3 Проведена проверка однородности выборок с данными о расходе топлива, соответствующих движению поездов в чётном и нечётном направлениях. Результаты проверки показали, что выборки являются однородными и могут быть объединены, что позволило повысить статистическую значимость результатов анализа.

4 Выполнена статистическая обработка выборок с информацией о расходе топлива на тягу, учитывающая вес поезда. Показано, что влияние ветра на расход топлива более значимо для поездов с минимальной нагрузкой на ось (порожних), чем с максимальной (гружёных).

3 ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕГО ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

3.1 Методика выполнения исследования

Впервые дифференциальные уравнения движения жидкости были выведены Л. Эйлером. Эти уравнения называются основными дифференциальными уравнениями движения идеальной жидкости и которые выглядят следующим образом [13]:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \frac{dv_y}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \frac{dv_z}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{cases} \quad (3.1)$$

где X, Y, Z – проекции массовых сил, отнесённых к единице массы частицы;

ρ – плотность газа (жидкости), кг/м³.

При использовании метода Эйлера рассматривается распределение скоростей жидких частиц в пространстве, т. е. рассматривается некоторая точка с координатами x, y, z и изучается как изменение скорости в указанной точке с течением времени, так и изменение скорости вследствие перехода к другим точкам пространства [13].

Как отмечалось ранее, в настоящее время широкое применение при решении задач аэрогидромеханики находят вычислительные программные пакеты.

В настоящей работе, для выполнения расчёта использован программный пакет *SOLIDWORKS*, в состав которого входит расширение *Flow Simulation*. *SOLIDWORKS Flow Simulation* – вычислительный инструмент для моделирования потоковых процессов в текучей среде *Computational Fluid Dynamics* (CFD-анализ), полностью встроенной в *SOLIDWORKS* [2, 3]. В *SOLIDWORKS Flow Simulation*

определение аэродинамического сопротивления поезда выполняется с помощью решения трёхмерных нестационарных нелинейных уравнений Навье-Стокса с учётом вязкости, которые в общем виде имеют следующий вид [13]:

$$\begin{cases} \rho \frac{d\omega_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x \\ \rho \frac{d\omega_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \omega_y \\ \rho \frac{d\omega_z}{dt} = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega_z \end{cases}, \quad (3.2)$$

где ω_i – компоненты вектора скорости, м/с;

p – давление, Па;

t – время, с;

μ – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с;

ρ – плотность среды, кг/м³;

∇ – оператор набла.

Оператор набла – векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}, \quad (3.3)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы по осям соответственно.

Проведение имитационного моделирования в среде *SOLIDWORKS Flow Simulation* предполагает разработку твердотельной модели испытуемого объекта, определение вычислительной области, которая разделяется на ячейки, где моделируется поток, и решению системы нелинейных уравнений Навье-Стокса с учётом вязкости жидкости, условия неразрывности и её теплопроводности. В общем виде уравнение неразрывности имеет следующий вид [13]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (3.4)$$

Уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} S, \quad (3.5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, (Вт/м²·К).

Для проверки адекватности получаемых в результате расчёта в программе *SOLIDWORKS* результатов было выполнено сравнение результатов расчётов по определению качественных и количественных характеристик обтекания одного из стандартных тел с результатами экспериментального исследования по определению аналогичных параметров этого же тела. В качестве такого тела с известными характеристиками был выбран шар (рисунок 3.1), относящийся к категории неудобообтекаемых тел [63]. Было выполнено сравнение вычисленных полей скоростей и направлений движения воздуха в потоке, обтекающем шар, а также силы, действующей на шар со стороны движущегося потока, с результатами экспериментов, выполненных другими авторами (рисунок 3.2) [63]. В таблице 3.1 приведены параметры тела и потока, исследование которых было выполнено.

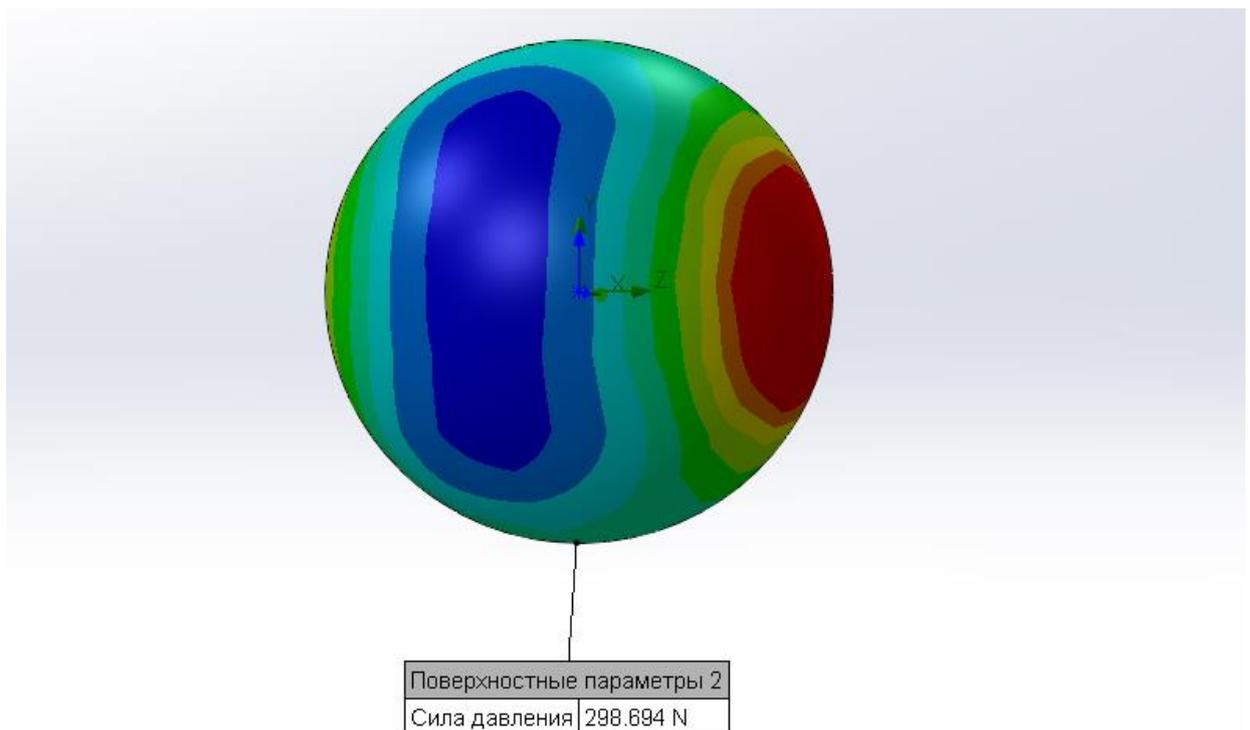


Рисунок 3.1 – Действующая на модель сферы аэродинамическая сила давления

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчёта коэффициента лобового сопротивления

Исходные параметры для расчёта	Числовые значения параметров
Диаметр сферы, м	1
Давление, Па	101325
Температура, К	293,2
Сила давления, Н	298,6

Величина коэффициента лобового сопротивления C_{zp} вычислялась по известной формуле [8]:

$$C_{zp} = \frac{2 \cdot F_{сопр}}{\rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (3.6)$$

где, $F_{сопр}$ – величина силы, действующей на тело при взаимодействии с потоком, определяется в результате выполнения расчётов, Н. Данная сила определяется как сумма сил нормального давления на поверхности тела и силы трения, возникающей при обтекании тела жидкостью;

ρ – плотность воздуха, кг/м³, при $T=20$ °С, $\rho=1,22$ кг/м³;

v – скорость набегающего потока воздуха, м/с;

S – наибольшая (миделева) площадь поперечного сечения обтекаемого тела.

Для сферы $S = \pi d^2 / 4$, где d – диаметр сферы, м.

Для сопоставления результатов расчёта с экспериментальными данными было вычислено число Рейнольдса, а затем был построен график зависимости расчётного коэффициента лобового сопротивления сферы C_z от числа Рейнольдса Re в одних координатных осях с экспериментальными данными на рисунке 3.2.

Число Рейнольдса Re определяется по следующей формуле [13]:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (3.7)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

d – диаметр сферы, м;

v – скорость набегающего потока воздуха, м/с;

η – коэффициент динамической вязкости воздуха 17,2 мкПа·с.

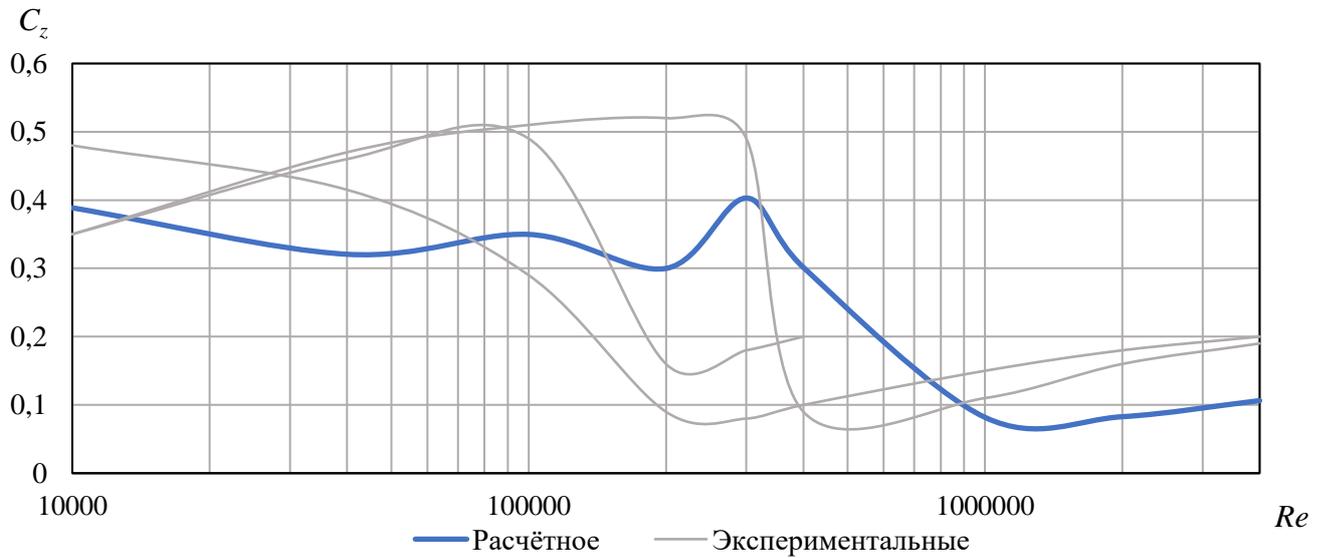


Рисунок 3.2 – Графики расчетного и экспериментальных значений коэффициента лобового сопротивления сферы

Расчётный график коэффициента лобового сопротивления тела C_z от числа Рейнольдса Re $C_z(Re)$ построен по данным таблицы 3.2 на основе данных, полученных при расчёте в приложении *SOLIDWORKS*.

Таблица 3.2 – Расчетные данные числа Рейнольдса (Re) и коэффициента лобового сопротивления C_z

Re	10^4	$4 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	10^6	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$
C_z	0,389	0,321	0,35	0,3	0,403	0,301	0,082	0,083	0,106

Как видно из представленных результатов, расчётные значения величины коэффициента в достаточной мере соответствуют экспериментальным данным, полученными другими авторами [63]. Расхождение в результатах расчёта и эксперимента объясняется различием условий, в которых были проведены численный и натурные эксперименты. Таким образом, подтверждается возможность использования программного пакета *SOLIDWORKS* для выполнения расчётов.

3.2 Модель поезда и ветровой нагрузки

Для определения скорости ветрового потока, которая будет использоваться при выполнении расчётов по нахождению аэродинамического сопротивления использовалась методика [105] для вычисления средней пиковой скорости ветра, на основе данных метеостанции о максимальном и среднем значении скорости ветра за выбранный период наблюдений [64].

Устойчивые значения пиковых скоростей ветра определяются по формуле:

$$\omega = \bar{\omega} + k\sigma_{\omega}, \quad (3.8)$$

где ω – максимальная скорость ветра;

$\bar{\omega}$ – средняя скорость ветра, равная 6 м/с, значение которой принято на основании результатов анализа розы ветров метеостанции Эльтон (рисунок 1.11) [75];

σ_{ω} – стандартное отклонение естественной скорости ветра;

k – коэффициент достоверности.

Различные значения k соответствуют разным коэффициентам значениям коэффициента надёжности, который определяется, как вероятность того, что средняя пиковая скорость ветра не превысит $\bar{\omega} + k\sigma_{\omega}$. При k равном 2,84 вероятность того, что пиковая скорость ветра не превысит $\bar{\omega} + k\sigma_{\omega}$ составляет 99,77 %. При ветровом потоке, действующем под углом к оси пути, земляное полотно оказывает значительное влияние на траекторию и скорость воздушного потока, способствуя дополнительному вихреобразованию и турбулизации потока, а следовательно, оказывая влияние на характер взаимодействия подвижного состава с воздушным потоком [94]. Стандартное отклонение скорости ветра зависит главным образом от средней скорости ветра и интенсивности турбулентности; оно рассчитывается по формуле [105]:

$$\sigma_{\omega} = I_z \bar{\omega}, \quad (3.9)$$

где I_z – интенсивность турбулентности, которую вычисляют по формуле:

$$I_z = \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} \left(1 - \frac{5}{10^5} \left(\lg\left(\frac{h_0}{0,05}\right) + 2 \right)^7 \right), \quad (3.10)$$

где h – высота насыпи над уровнем земли, $h = 2$ м;

h_0 – шероховатость насыпи, $h_0 = 0,07$ м.

В результате вычислений по формуле (3.9) получено значение $I_z = 0,295$. Тогда стандартное отклонение скорости ветра $\sigma_\omega = 2,066$, а сама средняя пиковая скорость ветра равна 13 м/с.

Для определения аэродинамического сопротивления поезда в соответствии с принципом обратимости [49, 56], использована неподвижная твердотельная модель подвижного состава в сочетании с элементами верхнего строения пути, находящаяся под действием текучей среды, движущейся с постоянной скоростью. Принцип обратимости заключается в следующем: величина, направление и точка приложения аэродинамических сил не зависят от того, обтекается ли тело потоком воздуха, или же оно движется в неподвижном воздухе, и определяются только величиной и направлением относительной скорости тела и потока. Расчётная схема, использованная в работе, представлена на рисунке 3.3.

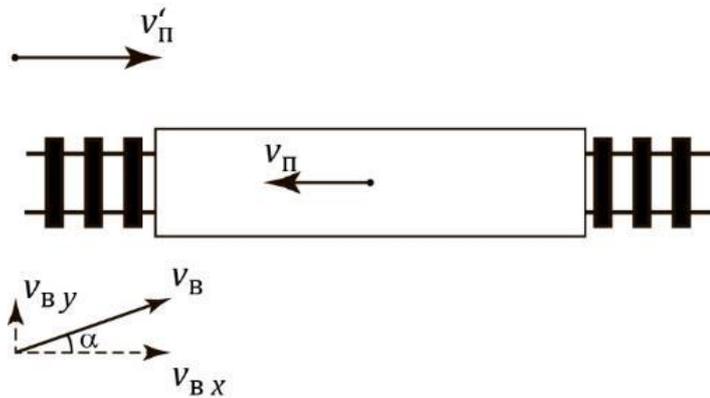


Рисунок 3.3 – Схема учёта дополнительного ветрового воздействия на поезд

Скорость эквивалентного воздушного потока v'_Π , воздействующего на поезд, равна:

$$v'_\Pi = -v_\Pi + v_{Bx} = -v_\Pi + v_B \cos \alpha, \quad (3.10)$$

где v_Π – скорость поезда, м/с;

v_B – скорость ветра, м/с;

v_{Bx}, v_{By} – проекции скорости ветра на ось x и на ось y , м/с.

Для учёта ветровой нагрузки, которая действует под углом к оси движения поезда, использовано правило разложения силы по двум векторам, а скорость поезда в соответствии с принципом обратимости будет равна скорости воздушного потока, взятой со знаком минус.

Расчёты были выполнены для разной загруженности подвижного состава, при различных сочетаниях скоростей и направлений скорости воздушного потока, для случая движения поезда в безветренных условиях, т. е. при $v_B = 0$ м/с.

Таблица 3.3 – Исходные данные для расчёта в приложении *SOLIDWORKS*

Исходные параметры расчёта	Числовые значения параметров
Давление, Па	101325
Температура, К	283,2
Скорость по оси x (v_{Bx}), м/с	– (5,5; 11,1; 16,6; 22,2; 27,7)
Скорость по оси y , м/с	0
Скорость по оси z (v_{Bz}), м/с	– (0, 3, 6, 9, 13)
Угол направления (α), град	0, 15 ... 180

Знак «минус» ставится с учётом направления координатных осей при задании начальных условий в программе расчёта. Все расчёты произведены при нормальном давлении атмосферного воздуха, с учётом гравитации и при температуре 10 °С.

Для выполнения расчёта была создана модель поезда, состоящего из односекционного локомотива (рисунок 3.4), по своим основным геометрическим размерам, соответствующем одной секции магистрального тепловоза, а также из 26 полувагонов (рисунок 3.5). Модели всех экипажей выполнены в масштабе 1:1.

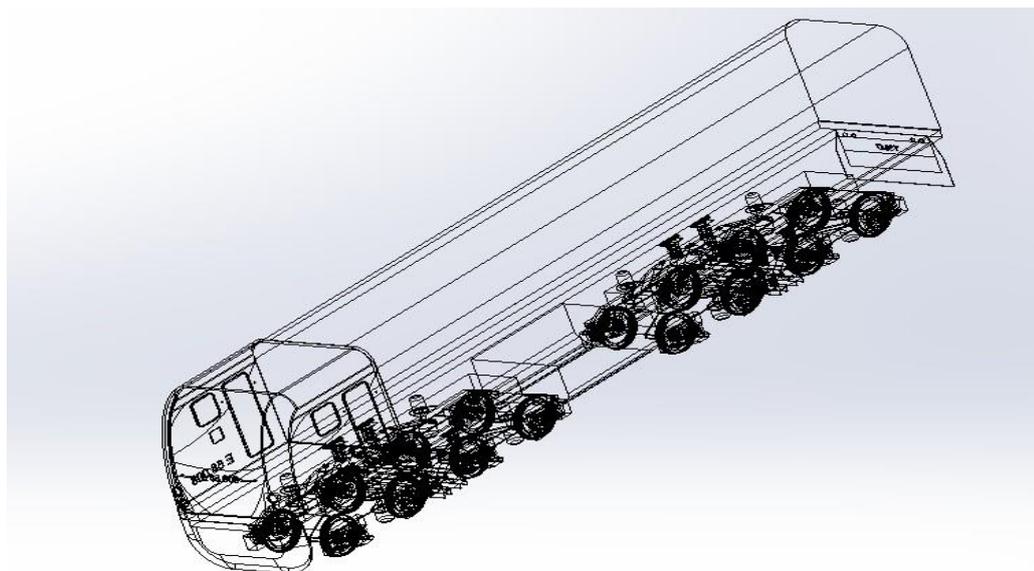


Рисунок 3.4 – Модель односекционного грузового тепловоза

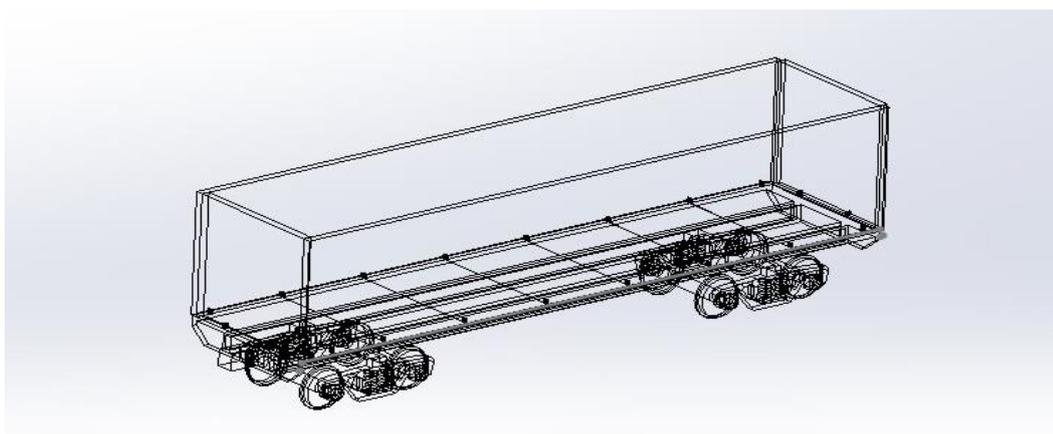


Рисунок 3.5 – Модель полувагона 12-119

При разработке модели были учтены основные геометрические параметры локомотива и вагонов, конфигурация лобовой части локомотива, а также подвагонного оборудования локомотива и вагонов [53].

Для уменьшения затрат машинного времени при выполнении расчётов небольшие детали, такие как решётки жалюзи тепловоза, некоторые элементы ходовых частей, поручни, подножки и тому подобное были исключены из модели или заменены на простые геометрические формы. Это связано с тем, что учёт мелких деталей оказывает влияние только на качественную картину и количественные показатели распределения потоков в небольшой зоне расчётной

области, не оказывая влияния на картину распределения воздушного потока по составу в целом [93].

Подготовленная модель, состоящая из локомотива и 26 полувагонов на железнодорожной насыпи с рельсошпальной решёткой, была помещена в расчётную область, представляющую из себя параллелепипед (рисунок 3.6).

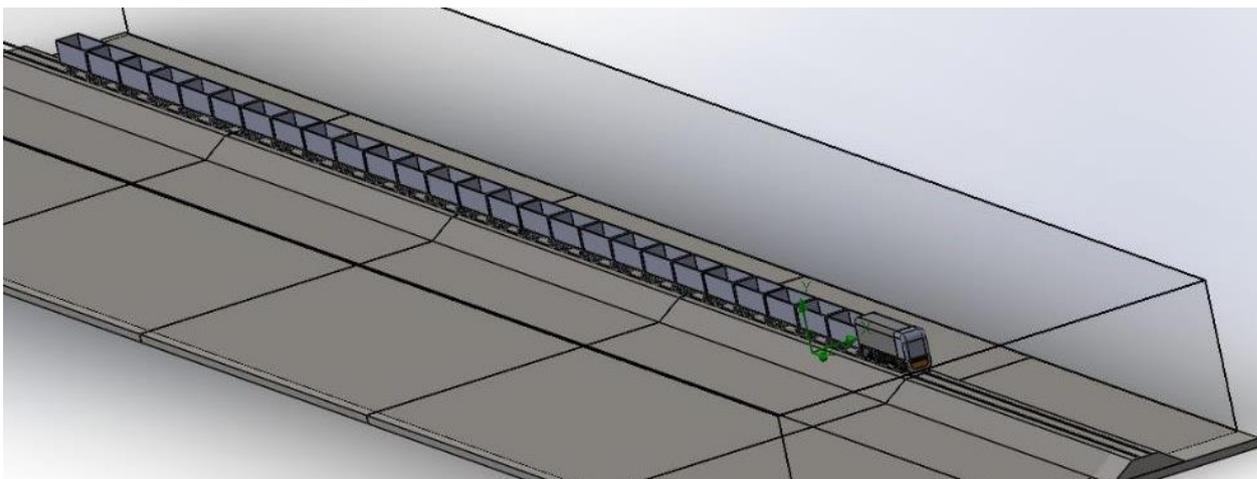


Рисунок 3.6 – Расчетная модель подвижного состава в программном комплексе *SOLIDWORKS*

Границы расчётной области располагались относительно локомотива на расстоянии 15 метров вверх от крайней точки крышевого оборудования, 12 метров с наветренной стороны и 42 метра с подветренной стороны от боковых стен, 2 метра вниз от точки контакта колесо-рельс, 50 метров от крайних точек сцепного оборудования по ходу и 100 метров против движения. Выбор размеров обусловлен расстоянием, за пределами которого движение потоков воздуха не влияет на объект исследования [82], а траектории воздушного потока, обтекающего исследуемый объект, примерно соответствуют траектории невозмущённого воздушного потока.

3.3 Анализ результатов расчёта

В результате выполнения расчётов были определены величины сил взаимодействия между вагонами и набегающим потоком воздуха. Также были исследованы поля скоростей воздушного потока в различных сечениях поезда как для порожнего, так и для гружёного составов. Результаты расчётов приведены в таблицах (3.4 – 3.6) и в виде экранных копий из программы *SOLIDWORKS* и представлены на рисунках (3.7, 3.8, 3.11 – 3.16, 3.19, 3.20).

В таблице 3.4 приведены результаты определения сил, действующих на вагоны, полученные при выполнении расчёта применительно к поезду, движущемуся со скоростью $v_{п} = 60$ км/ч при скорости ветра $v_{в} = 13$ м/с, соответствующей среднему пиковому значению скорости ветрового потока.

Для определения влияния направления ветра на силы, действующие на экипажи поезда, изменялась величина угла между векторами скорости поезда и ветрового потока в диапазоне от нуля (встречный ветер) до ста восьмидесяти градусов (попутный). Также для сравнения приведены величины сил, действующие на экипажи поезда при движении со скоростью 60 км/ч при отсутствии ветра.

На рисунке 3.7, *а*, *б* приведены результаты расчёта, иллюстрирующие картину распределения давления воздушного потока на поверхности экипажей при движении поезда со скоростью 17 м/с и действии на него ветрового потока со скоростью 13 м/с, направленного под углом 75° к оси пути соответственно для головной и хвостовой частей поезда.

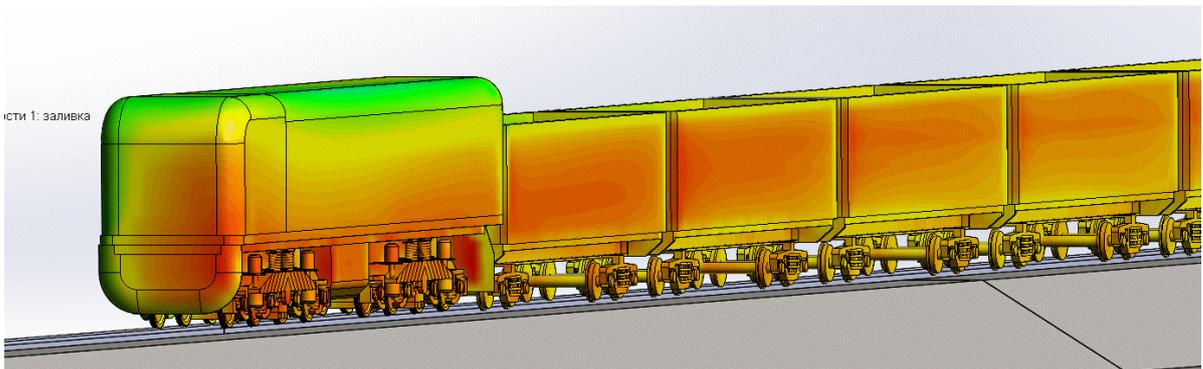
Красному цвету соответствуют области повышенного давления, синему – области пониженного давления. Как видно, при действии встречного воздушного потока, направленного под углом к направлению движения поезда, области повышенного давления создаются на боковых поверхностях подвижного состава.

Таблица 3.4 – Результаты расчёта для порожнего поезда

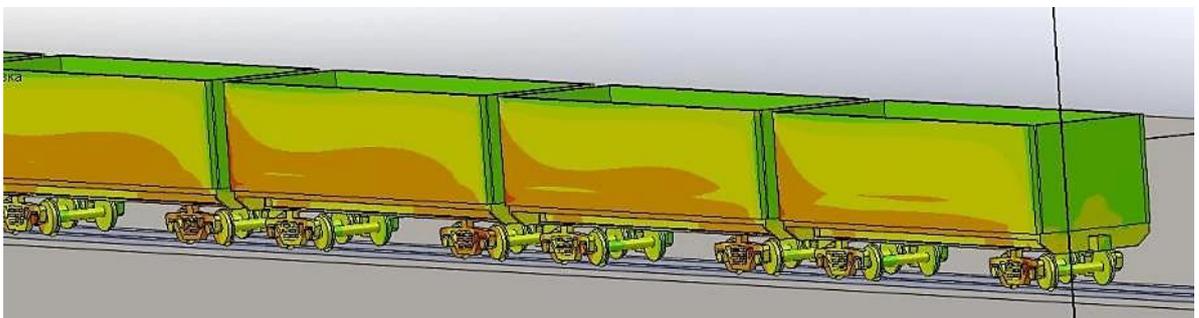
№ экипажа поезда	Сила, действующая на экипаж, Н													
	$v_B = 0$ м/с	Угол α при $v_B = 13$ м/с												
		Угол α° между векторами скорости поезда и ветрового потока												
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
1	-1479	-3484	-4628	-5262	-5799	-5767	-5208	-4187	-2554	-1760	-1384	-1066	-634	-245
2	-332	-650	-619	-903	-416	-611	-477	-260	-80	-13	-6	-27	-67	-50
3	-279	-628	-692	-1019	-1041	-1108	-1136	-591	-399	-335	-227	-179	-183	-80
4	-297	-668	-655	-1018	-775	-886	-768	-723	-491	-518	-228	-104	-60	-32
5	-258	-577	-545	-981	-931	-896	-1024	-1183	-711	-493	-351	-169	-100	-22
6	-242	-546	-684	-885	-653	-826	-874	-922	-816	-699	-437	-178	-90	-54
7	-174	-419	-695	-796	-1041	-809	-1206	-1226	-1082	-800	-578	-303	-134	-50
8	-193	-433	-568	-694	-608	-925	-1209	-1211	-890	-517	-390	-251	-82	-43
9	-195	-438	-698	-794	-1049	-1118	-1222	-1330	-1181	-960	-642	-391	-139	-55
10	-197	-444	-603	-723	-705	-1130	-1301	-1164	-941	-648	-420	-258	-95	-45
11	-190	-419	-690	-668	-1140	-1134	-1221	-1308	-854	-646	-511	-364	-152	-53
12	-202	-457	-596	-653	-836	-1154	-1183	-1166	-833	-854	-515	-311	-106	-43
13	-229	-519	-646	-714	-1078	-1278	-1298	-1325	-926	-634	-546	-337	-141	-49
14	-221	-500	-622	-730	-978	-1270	-1278	-1220	-873	-569	-437	-303	-127	-45
15	-245	-541	-652	-772	-1337	-1308	-1301	-1176	-1232	-881	-622	-372	-174	-50
16	-227	-496	-629	-779	-1038	-1278	-1310	-1253	-734	-541	-431	-301	-135	-40
17	-233	-521	-683	-865	-1122	-1315	-1301	-1375	-950	-909	-541	-355	-147	-46
18	-224	-502	-620	-832	-939	-1224	-1285	-1316	-864	-655	-485	-273	-125	-39
19	-227	-523	-626	-865	-1368	-1224	-1285	-1472	-725	-575	-412	-361	-180	-50
20	-232	-501	-618	-874	-1139	-1292	-1355	-1370	-983	-842	-444	-329	-149	-39
21	-173	-387	-507	-748	-995	-1331	-1354	-1279	-806	-533	-429	-291	-131	-44
22	-204	-466	-577	-890	-1095	-1194	-1219	-1303	-770	-613	-474	-320	-159	-59
23	-181	-396	-465	-711	-995	-1295	-1270	-1154	-916	-720	-512	-273	-132	-42
24	-187	-388	-509	-823	-1363	-1053	-1071	-1222	-793	-614	-433	-329	-168	-34
25	-163	-369	-484	-788	-1082	-1200	-1180	-1112	-947	-739	-473	-308	-138	-41
26	-186	-436	-511	-808	-1013	-1126	-1123	-1126	-770	-583	-511	-290	-165	-75
27	-488	-980	-1093	-1414	-1701	-1119	-1113	-1229	-1100	-835	-600	-435	-303	-171
Сумма	-7458	-16688	-20900	-26979	-32192	-34811	-35497	-34113	-30342	-24890	-19349	-14636	-11266	-7616

По сравнению со случаем встречного ветра (рисунок 3.8, *а*, *б*, скорость движения поезда 17 м/с, скорость ветра 13 м/с), область повышенного давления на локомотиве сместилась в сторону в соответствии с направлением результирующего вектора скорости, при этом появились области повышенного давления в зонах углов кузовов вагонов. Таким образом, несмотря на некоторое снижение величины наибольшего давления со 104 кПа при встречном направлении ветра и 103 кПа при направлении под углом, в результате увеличения площади поверхности поезда, подверженной действию повышенного давления, составляющая силы аэродинамического воздействия на вагоны поезда существенно возрастает, увеличивая силу сопротивления движения.

а)



б)



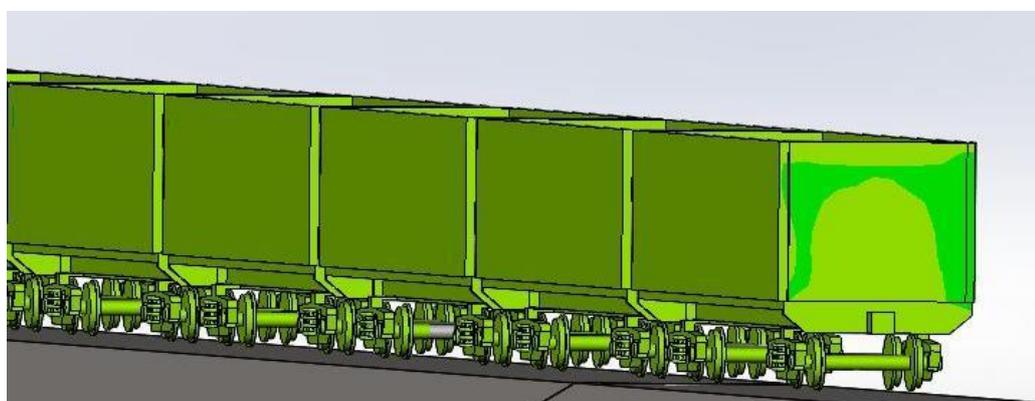
а – в головной части поезда; *б* – в хвостовой части поезда

Рисунок 3.7 – Распределение давления воздуха на поверхности экипажей при ветре, направленном под углом 75° к направлению движения поезда

а)



б)



а – в головной части поезда; б – в хвостовой части поезда

Рисунок 3.8 – Распределение давления воздуха на поверхности экипажей при встречном направлении ветра к направлению движения поезда

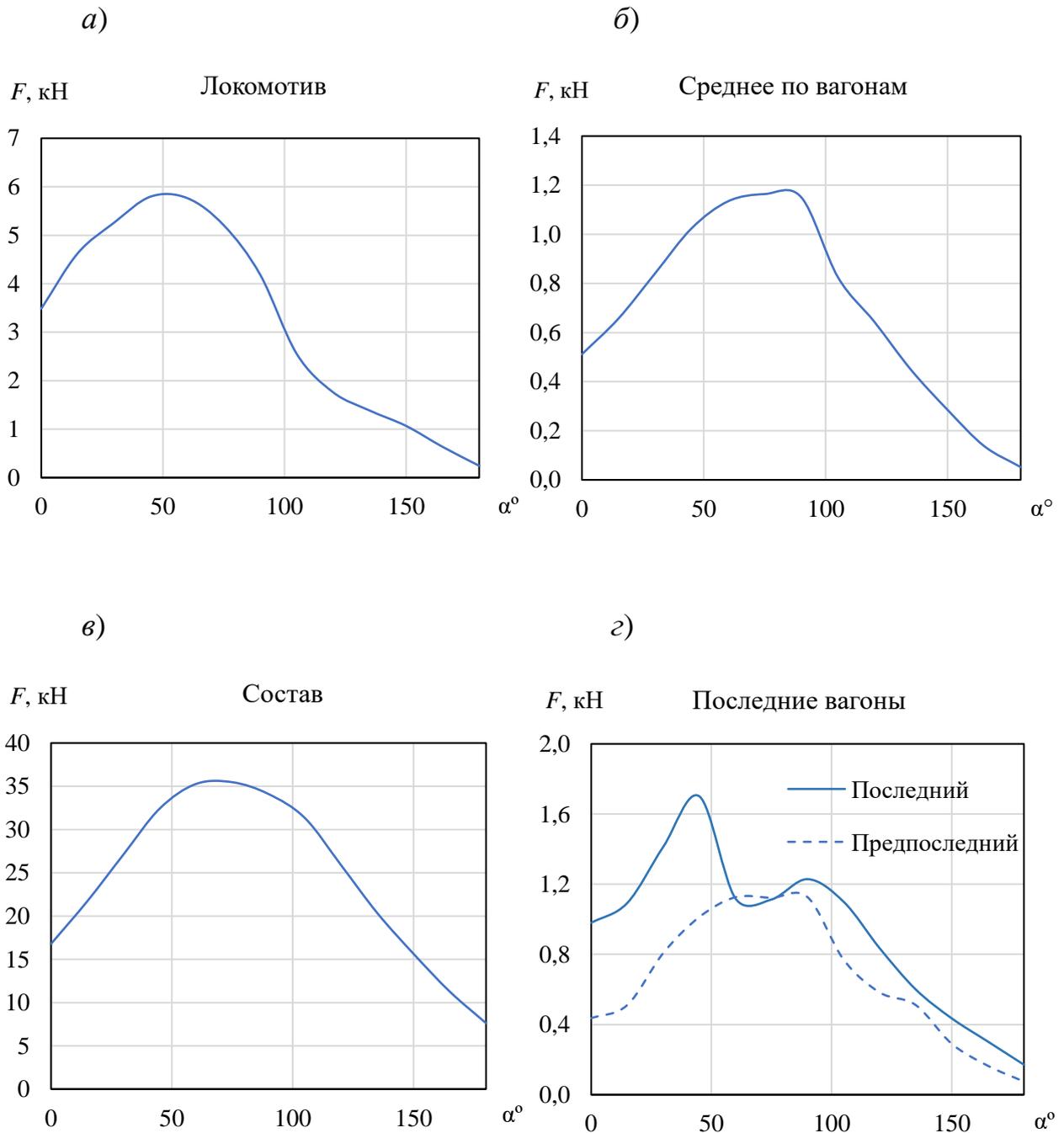
В таблице 3.5 приведены результаты расчёта сил аэродинамического воздействия на вагоны порожнего поезда в безветренную погоду при различных значениях скорости подвижного состава.

По результатам расчётов, приведённых в таблице 3.4, построены графики зависимости силы давления на экипажи поезда от угла направления ветрового потока для случая выполнения расчётов применительно к порожнему составу, а именно для локомотива (рисунок 3.9, а), среднего значения по вагонам (рисунок 3.9, б) суммарного для всего поезда (рисунок 3.9, в), и для двух последних вагонов (рисунок 3.9, г).

Таблица 3.5 Силы аэродинамического давления, действующие на порожний поезд без ветра

№ экипажа поезда	Сила, действующая на экипаж, Н				
	Скорость движения поезда, км/ч				
	20	40	60	80	100
1	-723	-926	-1479	-1741	-2343
2	-14	65	-332	-249	-387
3	-3	-80	-279	-317	-493
4	-20	-56	-297	-226	-352
5	-14	-99	-258	-399	-621
6	-24	-49	-242	-197	-312
7	-12	-93	-174	-379	-588
8	-22	-65	-193	-264	-415
9	-18	-89	-195	-359	-555
10	-20	-74	-197	-303	-473
11	-19	-81	-190	-330	-511
12	-20	-78	-202	-317	-504
13	-17	-79	-229	-321	-503
14	-19	-71	-221	-291	-454
15	-17	-77	-245	-314	-492
16	-18	-72	-227	-297	-477
17	-16	-74	-233	-299	-463
18	-15	-68	-224	-281	-447
19	-15	-64	-227	-248	-386
20	-16	-60	-232	-251	-390
21	-13	-64	-173	-257	-401
22	-15	-53	-181	-217	-341
23	-16	-64	-187	-253	-395
24	-11	-66	-163	-265	-384
25	-17	-45	-186	-183	-395
26	-26	-70	-204	-279	-436
27	-27	-98	-488	-382	-596
Сумма	-1516	-4180	-7458	-14877	-15864

На рисунке 3.10 представлены графики зависимостей силы давления на экипажи поезда при различных значениях направления ветровой нагрузки, составляющей 0, 30, 75 и 180°, построенные по данным, приведённым в таблице 3.4. Как видно из рисунка 3.10, группа вагонов (со второго по шестой), расположенные непосредственно за локомотивом имеют большой разброс величин сил давления воздушного потока по сравнению со средним по составу, при этом их величина значительно меньше, чем у локомотива. Стабилизируется сила давления воздушного потока в большинстве случаев на седьмом экипаже, т. е. на шестом вагоне.



*а – для локомотива; б – среднего значения для вагонов в составе поезда;
в – среднего для всего состава; г – для двух последних вагонов*

Рисунок 3.9 – Зависимость силы давления от угла направления ветрового потока

Далее характер распределения величин сил, действующих на экипажи поезда, остаётся примерно неизменным, что позволяет на вагоны, следующие за шестым вагоном в составе поезда, и до двух последних вагонов масштабировать полученные результаты на поезд произвольной длины.

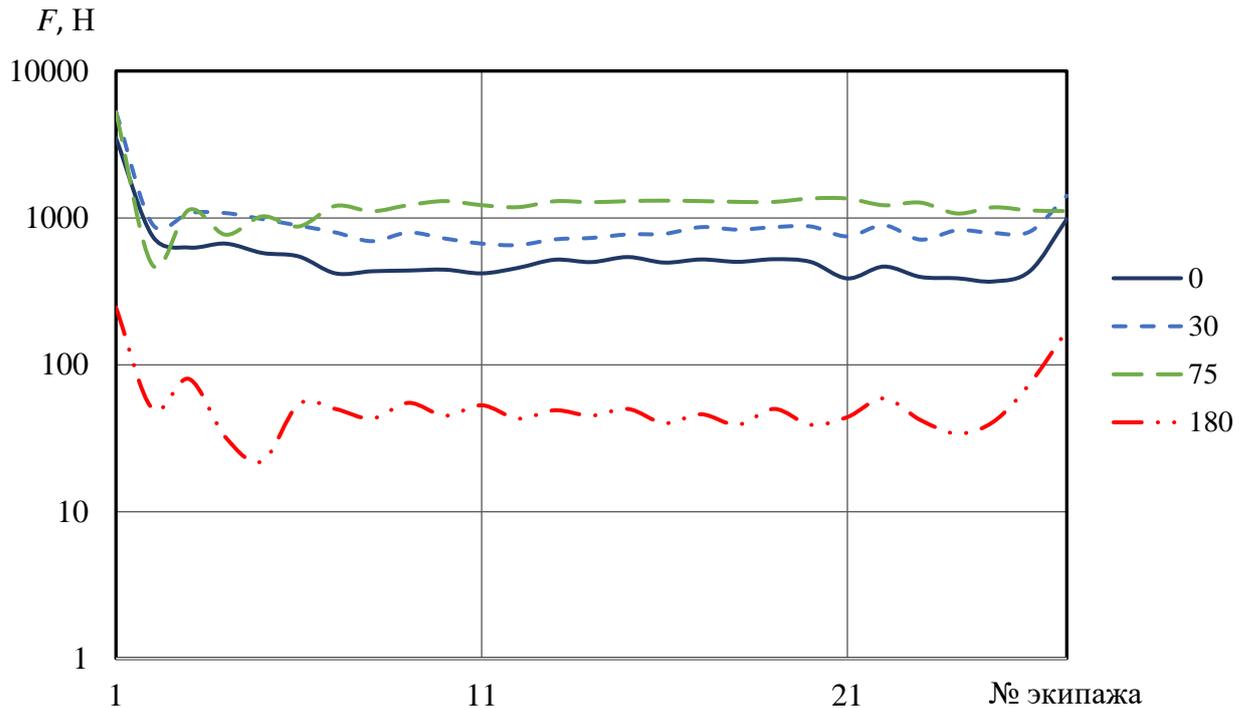


Рисунок 3.10 – Сила аэродинамического давления на каждый экипаж порожнего поезда при направлении ветровой нагрузки 0, 30, 75 и 180°

Далее на рисунках (3.11 – 3.14) приведены результаты расчёта поля скоростей воздушного потока и линии тока воздушной среды в горизонтальной плоскости, параллельной оси пути и расположенной на высоте 2 м от уровня головки рельсов, а также в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути и перпендикулярной оси пути при встречном и боковом направлении ветрового потока, позволяющие оценить траектории движения воздушных масс при взаимодействии с экипажами порожнего поезда.

Как видно из представленных результатов (таблица 3.4), величина силы давления существенно зависит от величины скорости потока, а также от величины угла между направлением движения поезда и ветрового потока. При скорости ветра $v_B=13$ м/с максимальное значение составляющей давления суммарной силы аэродинамического сопротивления, действующей на поезд, состоящий из порожних вагонов, достигается при величине угла, примерно равной 60 – 75°, при этом величина этой составляющей в 2 раза выше, чем при встречном направлении

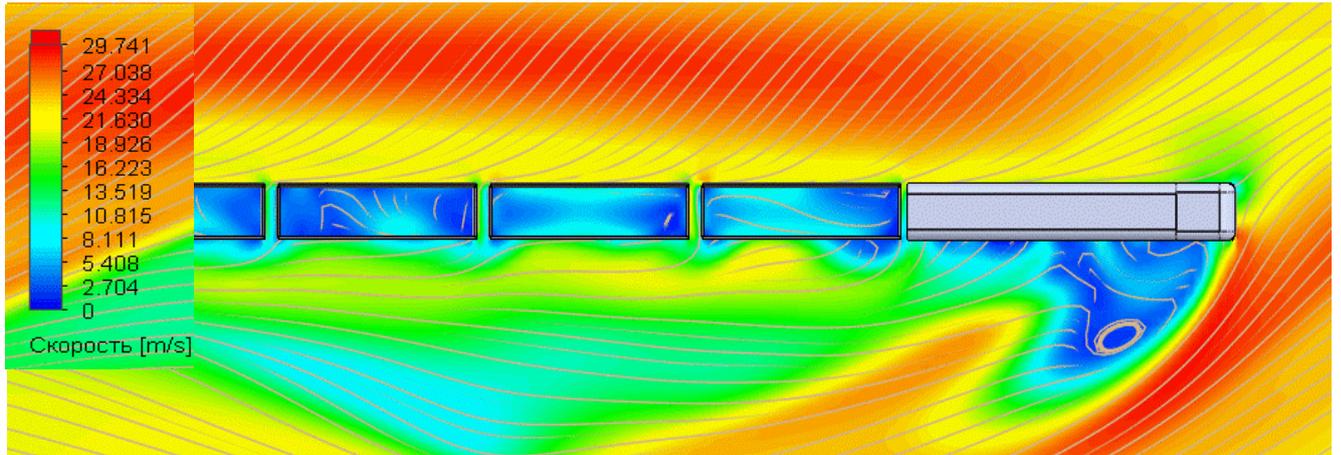
ветрового потока, так как при боковом направлении ветра сила давления равномерно действует на все вагоны поезда (таблица 3.4).

Было установлено, что зависимость величины силы, действующей на локомотив, от угла между векторами скорости поезда и ветра, несколько отличается от таковой, полученной при рассмотрении всего поезда. Так, для локомотива, наибольшая сила воздействия достигается при величине угла, равного 45° [24].

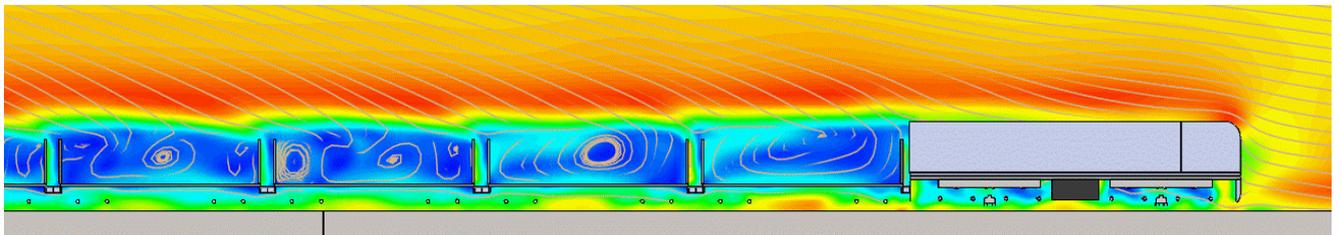
Как видно из таблицы 3.4, величины сил, действующих на группу вагонов, расположенную непосредственно за локомотивом, отличаются в меньшую сторону по сравнению с силами, действующими на остальные вагоны поезда, кроме последнего. Из рисунков 3.11 – 3.13, на которых приведено поле скоростей воздушного потока, а также линии тока для областей, соответствующих головной, средней и хвостовой частям поезда видно, что головная часть локомотива служит для набегающего под углом к оси пути воздушного потока экраном, способствуя отклонению воздушного потока от начальной траектории, интенсивному вихреобразованию вокруг головной части поезда, а также создаёт аэродинамическую «тень» для группы вагонов, расположенных непосредственно за локомотивом, вследствие чего характер их обтекания значительно отличается от аналогичного для вагонов, расположенных на большем удалении от локомотива [93].

Из рисунков 3.11 – 3.13 видно, что характер обтекания вагонов варьируется и зависит от местоположения вагона в поезде, он стабилизируется по мере удаления от головной части, так как при этом значительно снижается влияние эффекта экранирования набегающего потока локомотивом [25]. В середине состава (рисунок 3.12) характер течения является примерно одинаковым. В хвостовой же части поезда характер течения вокруг последних двух вагонов является отличным от картины, наблюдавшейся в головной и средней частях поезда, при этом изменяется величина силы, действующей на последние вагоны поезда (рисунки 3.11 – 3.13).

a)



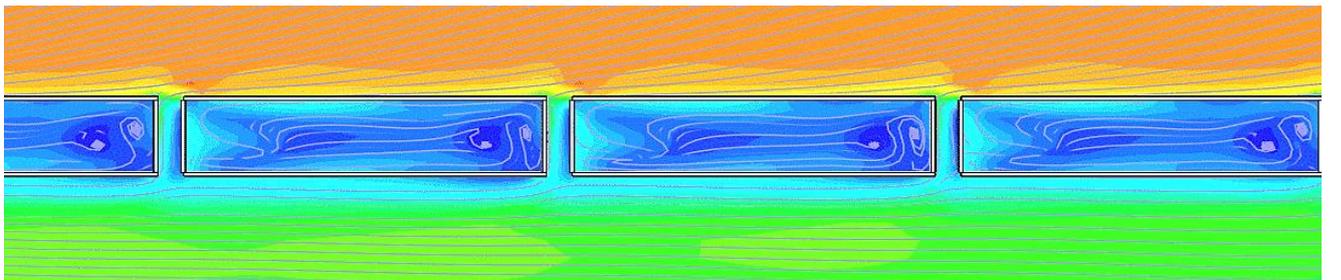
б)



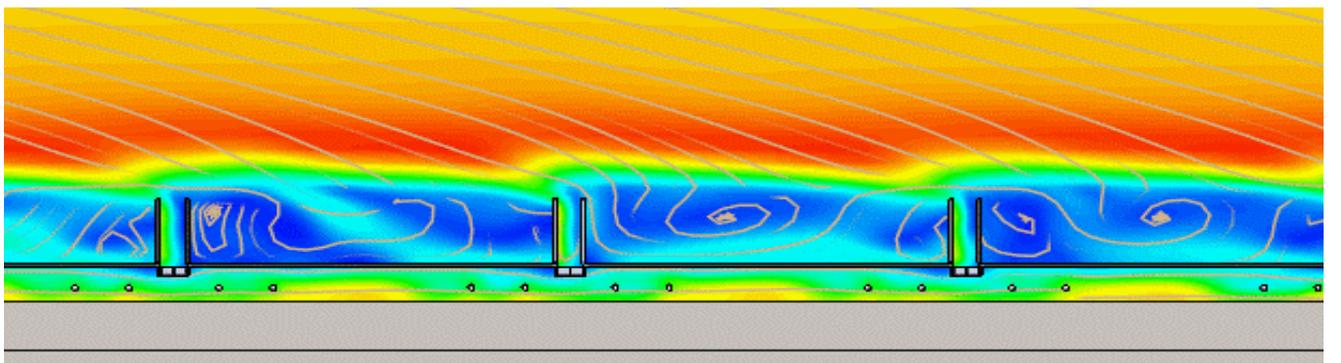
а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

Рисунок 3.11 – Поле скоростей и линии тока в области головной части поезда при угле между векторами скорости поезда и ветрового потока 75°

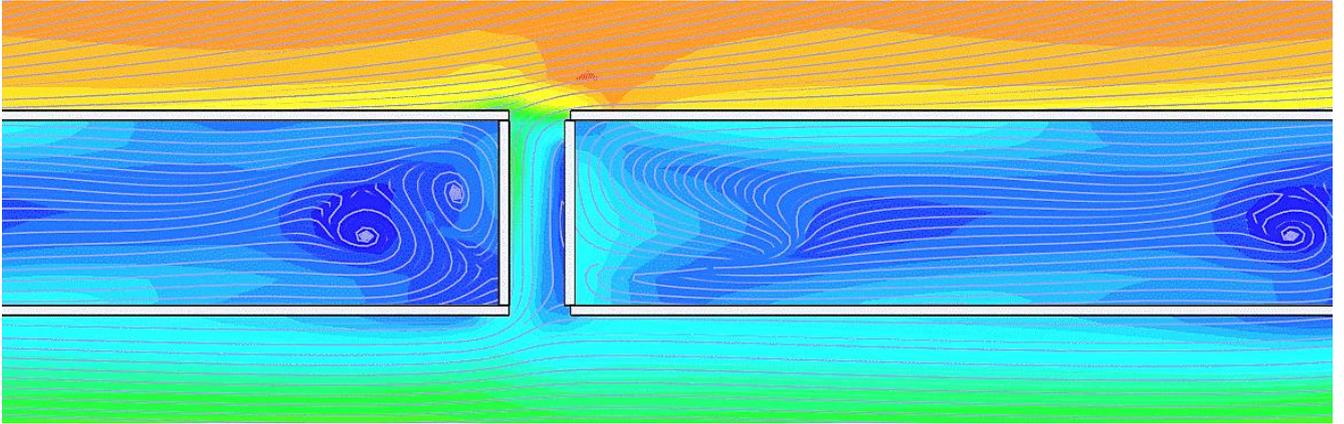
a)



б)



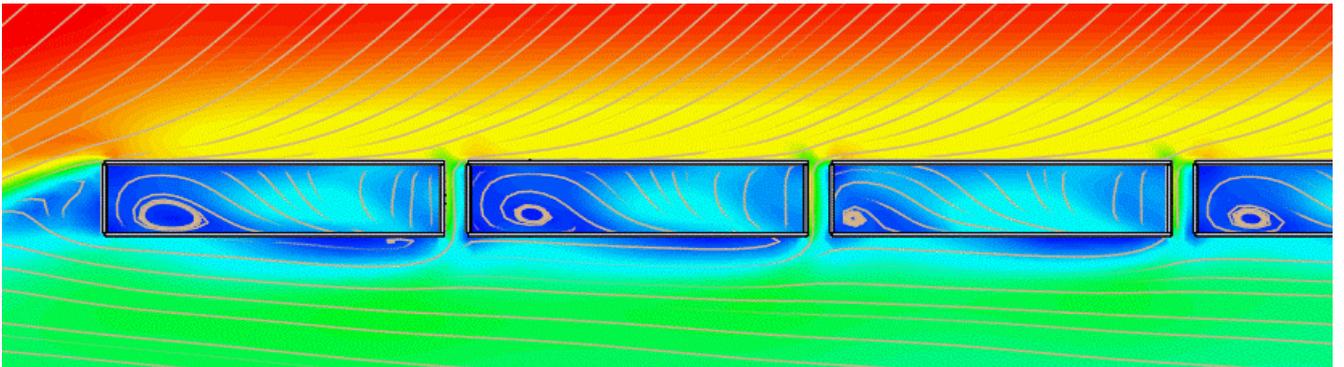
в)



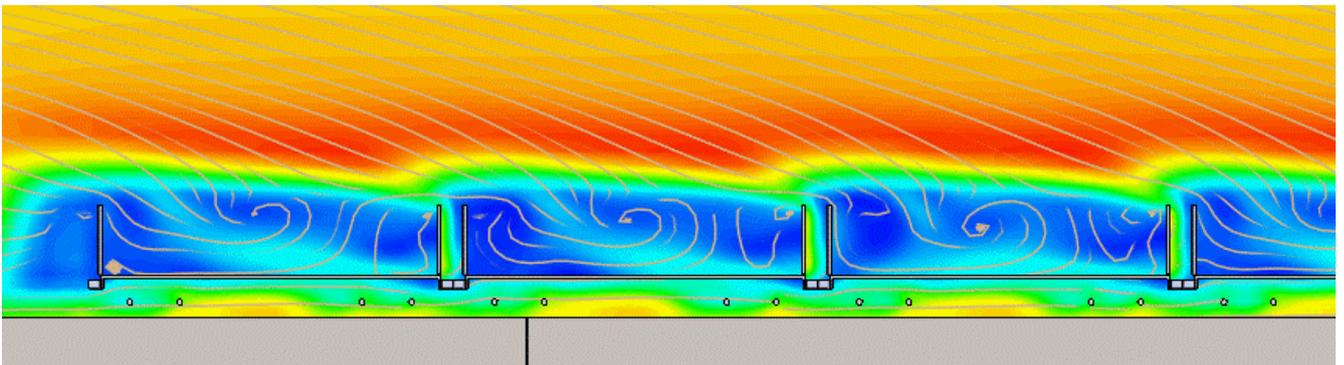
*а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути;
в – увеличенный фрагмент вида сверху*

Рисунок 3.12 – Поле скоростей и линии тока в области средней части поезда при угле между векторами скорости поезда и ветрового потока 75°

а)



б)



а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

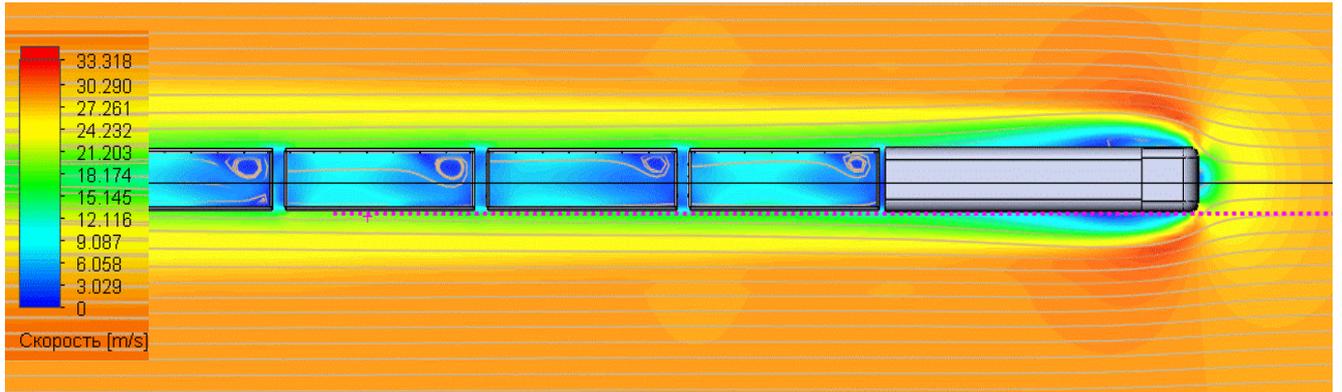
Рисунок 3.13 – Поле скоростей и линии тока в области хвостовой части поезда при угле между векторами скорости поезда и ветрового потока 75°

Отсутствие груза в кузовах вагонов способствует интенсивному вихреобразованию в них. Также, в порожнем вагоне площадь поверхности кузова, подверженная действию набегающего потока воздуха, значительно больше, чем в гружёном, за счёт сопротивления внутренних стенок кузовов (рисунки 3.11 – 3.13). Все эти факторы ведут к увеличению сил аэродинамического сопротивления, действующих на вагоны порожнего поезда по сравнению с гружёным, а значит и на поезд в целом [24].

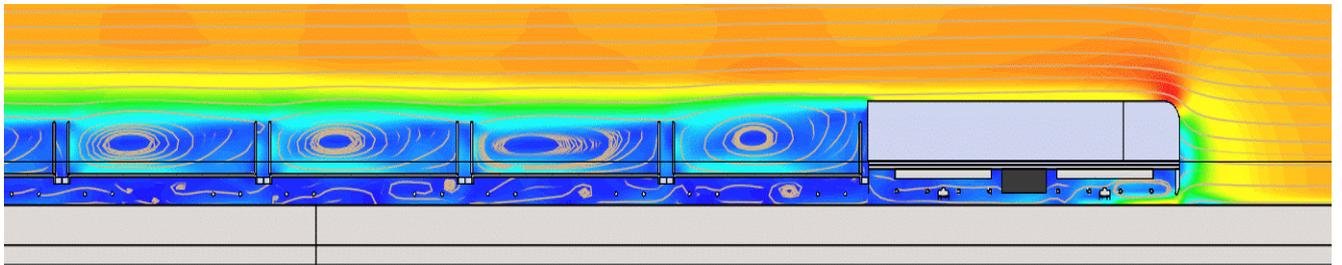
На рисунках 3.14 – 3.16 приведены результаты определения поля скоростей воздушного потока при взаимодействии поезда, движущегося со скоростью 17 м/с и встречного ветра скоростью 13 м/с. Как и в случае с распределением давления по поверхности поезда, полученные результаты достаточно существенно отличаются от результатов, полученных при исследовании действия бокового ветра, рассмотренного ранее. Так, практически отсутствует эффект «экрана» в зоне расположения локомотива. Вследствие этого значительно снижена неоднородность величин сил, действующих на вагоны поезда. В междувагонных промежутках в случае встречного направления ветра также существенно изменяется траектория воздушного потока. Если при боковом ветре в результате взаимодействия набегающего воздушного потока и стенок кузовов вагонов наблюдается «перетекание» воздуха с наветренной на подветренную части поезда через междувагонные промежутки и незначительное вихреобразование в зонах изменения кривизны поверхности кузовов (рисунок 3.12, в), то при встречном ветре «перетекание» отсутствует, а в междувагонных промежутках присутствуют достаточно интенсивные вихри (рисунок 3.15, в).

Аналогичные расчёты были проведены для сочетаний скоростей ветрового потока от 3 до 13 м/с и скоростей движения поезда от 20 до 100 км/ч, что позволило установить зависимость силы, действующей на экипажи поезда и поезд в целом от вышеперечисленных параметров.

a)



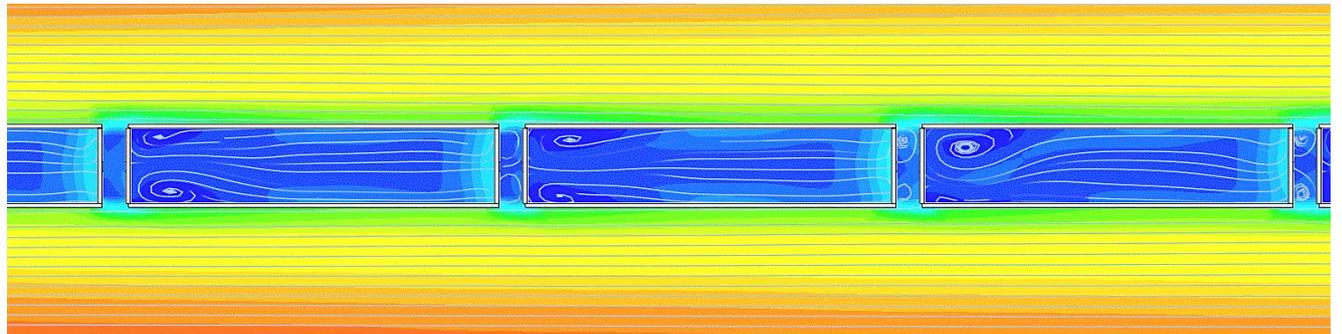
б)



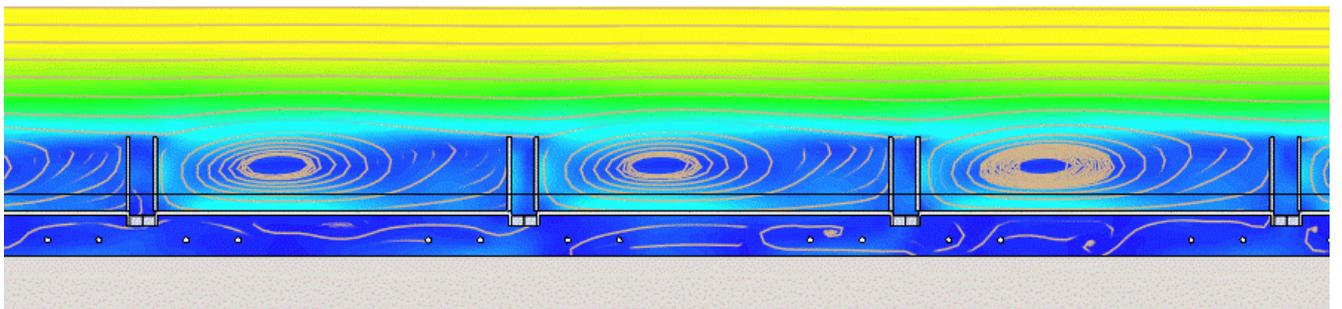
а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

Рисунок 3.14 – Поле скоростей и линии тока в области головной части поезда при встречном направлении ветрового потока

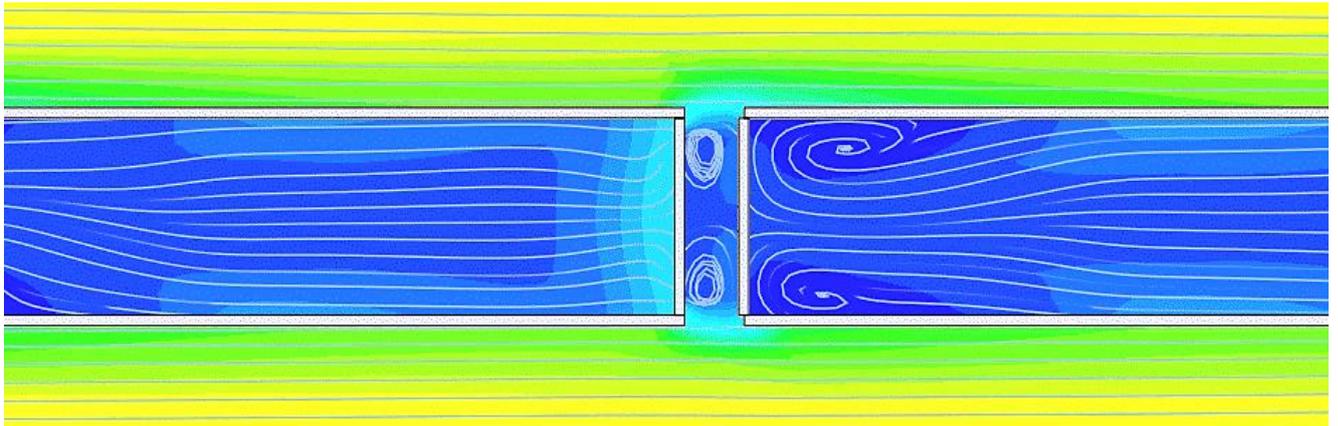
a)



б)



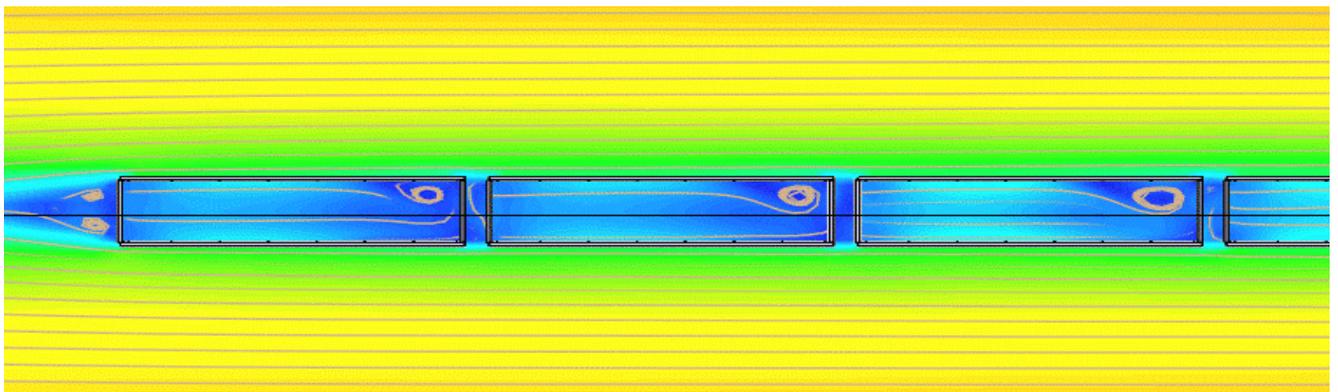
в)



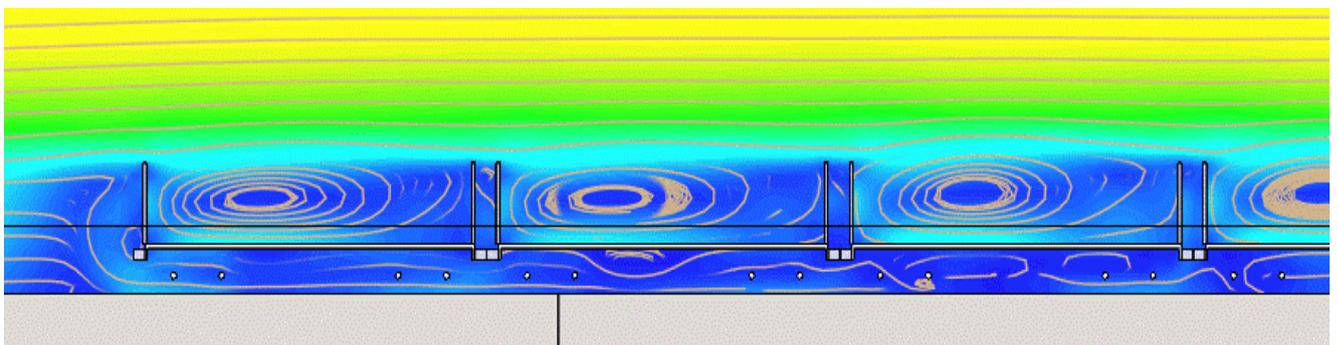
*а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути;
в – увеличенный фрагмент вида сверху*

Рисунок 3.15 – Поле скоростей и линии тока в области средней части поезда при встречном направлении ветрового потока

а)



б)



а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

Рисунок 3.16 – Поле скоростей и линии тока в области хвостовой части поезда при встречном направлении ветрового потока

Как видно из полученных результатов, по мере возрастания скорости движения, изменяются величины углов, при которых достигается наибольшее значение силы аэродинамического сопротивления – для локомотива с 45 до 60 градусов, а для состава – с 60 до 75 градусов. Абсолютное значение силы сопротивления, действующее на локомотив возрастает в 3 раза с 2000 Н до 6000 Н, на вагоны примерно в 2,5 раза с 600 Н до 1600 Н, на состав примерно в 4 раза с 16000 Н до 65000 Н. Характер распределение величин сил, действующих на экипажи поезда, остаётся примерно неизменным. Полученные результаты позволяют определять величины сил, действующих на поезд произвольной длины, для любых сочетаний скорости движения и ветрового потока, в заданном диапазоне, а также углов между ними.

Был проведен расчёт при аналогичных начальных параметрах влияния ветровой нагрузки и на грузовой поезд с гружёными полувагонами. Результаты расчёта представлены в таблице 3.6.

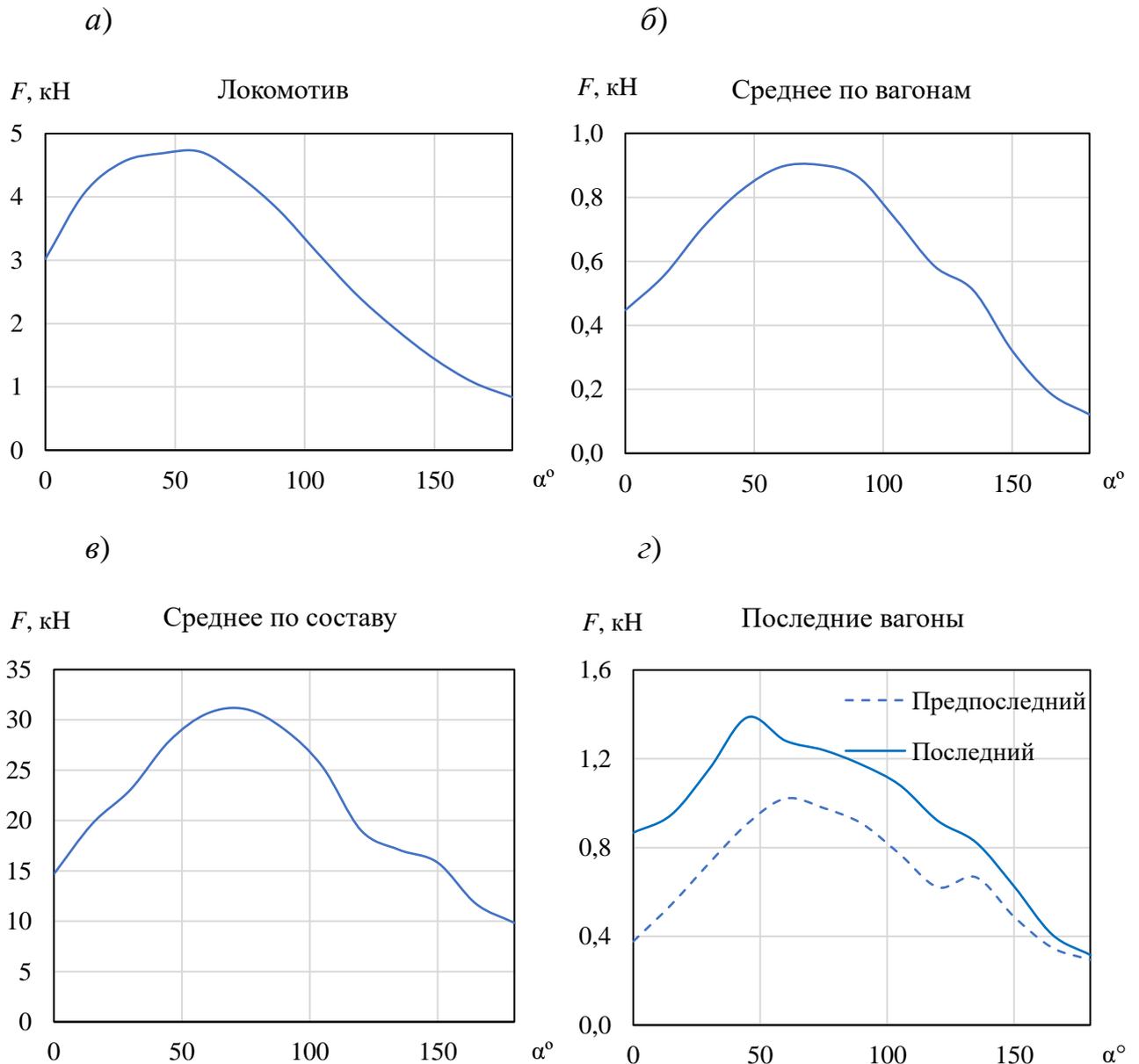
По результатам расчётов, приведённых в таблице 3.6, построены графики зависимости силы давления на экипажи поезда от угла направления ветрового потока для случая выполнения расчётов применительно к гружённому составу, а именно для локомотива (рисунок 3.17, *а*), среднего значения по вагонам (рисунок 3.17, *б*) суммарного для всего поезда (рисунок 3.17, *в*), и для двух последних вагонов (рисунок 3.17, *г*).

Как видно из рисунка 3.17, *а*, сила давления воздушного потока, действующая на локомотив, как и в случае с порожним составом равномерно возрастает до значения угла направления ветровой нагрузки равного 45°. Что касается среднего значения силы давления, действующего на вагоны в поезде, рисунок 3.17, *б*, то она меньше, чем в опыте с порожними полувагонами из-за лучшей обтекаемости формы загруженного полувагона, отсутствия открытых полостей. Равномерно возрастает до значения угла направления ветровой нагрузки равного 60°, а после убывает.

Таблица 3.6 – Результаты расчёта для гружёного поезда

№ экипажа поезда	Сила, действующая на экипаж, Н						
	Угол α° между векторами скорости поезда и ветрового потока						
	0	15	30	45	60	75	90
1	-3460	-4672	-5281	-5843	-5821	-5252	-4131
2	-98	-155	-401	-496	-364	-254	-125
3	-365	-348	-702	-780	-763	-621	-376
4	-278	-488	-866	-927	-802	-596	-444
5	-295	-555	874	-921	-883	-714	-678
6	-339	-364	-593	-615	-565	-579	-681
7	-354	-571	-734	-799	-749	-870	-959
8	-245	-554	-733	-863	-935	-1086	-1003
9	-226	-500	-512	-746	-868	-829	-687
10	-269	-533	-514	-805	-964	-973	-841
11	-224	-548	-525	-870	-937	-1113	-985
12	-248	-530	-551	-615	-817	-705	-701
13	-244	-506	-563	-813	-1039	-1033	-949
14	-296	-569	-592	-898	-1014	-1119	-981
15	-244	-425	-567	-661	-804	-716	-810
16	-235	-489	-676	-914	-994	-959	-875
17	-268	-487	-531	-907	-1048	-1043	-907
18	-282	-479	-633	-838	-840	-832	-777
19	-249	-424	-582	-643	-991	-816	-756
20	-280	-491	-686	-921	-1020	-1119	-956
21	-250	-468	-522	-869	-906	-852	-787
22	-298	-428	-505	-721	-878	-814	-747
23	-196	-456	-685	-911	-1058	-1092	-955
24	-194	-416	-609	-806	-846	-826	-748
25	-263	-459	-550	-715	-743	-776	-724
26	-306	-595	-979	-1158	-1189	-1079	-959
27	-732	-881	-1198	-1388	-1351	-1161	-1052
Сумма	-16025	-20715	-26765	-31167	-33460	-33117	-31352

Именно при направлении угла ветровой нагрузки под углом 60° на гружёный состав воздействует наибольшая сила аэродинамического давления рисунок 3.17, в. Что касается двух последних вагонов рисунок 3.17, г, то в опыте с гружёным составом нет резких перепадов по силе давления у последнего вагона. Это объясняется тем, что при загрузке вагона не создается дополнительных потоков турбулизации в его хвостовой части из-за открытых полостей. Графики силы давления двух последних вагонов примерно повторяют, друг друга возрастая до значения угла направления ветровой нагрузки в $45 - 60^\circ$, а далее при увеличении угла – убывают. Их абсолютные значения меньше, чем для порожних.



а – для локомотива; б – среднего значения для вагонов в составе поезда; в – среднего для всего состава; г – для двух последних вагонов

Рисунок 3.17 – Зависимость силы давления от угла направления ветрового потока для локомотива

На рисунке 3.18 приведены графики зависимости силы давления на каждый экипаж поезда при угле ветровой нагрузки равном $0, 30, 90, 180^\circ$. Из графиков видно, что и в случае с загруженными вагонами сила давления стабилизируется на 7 экипаже, далее возрастает у двух последних вагонов.

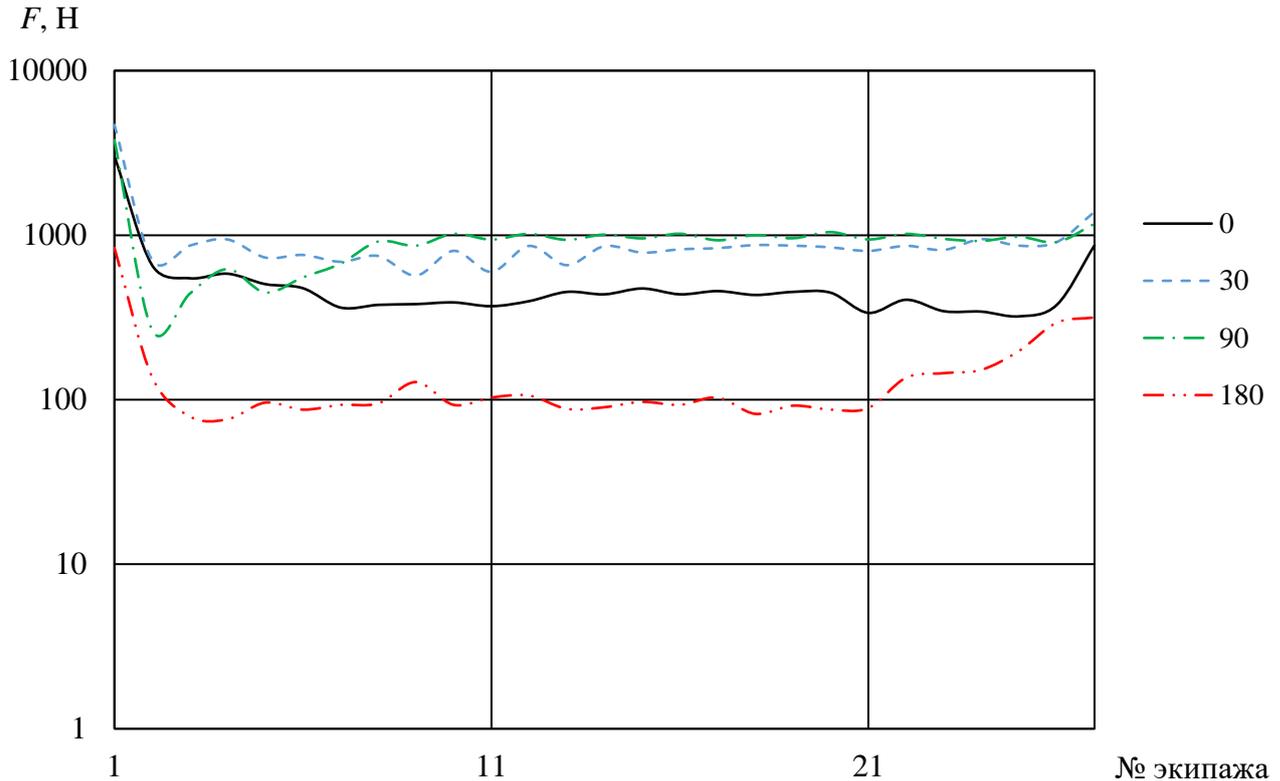


Рисунок 3.18 – Сила аэродинамического давления на каждый экипаж гружёного поезда при направлении ветровой нагрузки 0, 30, 75 и 180°

Разница сил давления, действующего на экипажи в составе поезда, при направлении ветрового потока под углом меньше, чем у порожних. Также значения, действующие на подавляющую часть экипажей в середине поезда можно экстраполировать на разные по длине составы.

Для дальнейших расчётов по нормированию расхода топлива был выведен коэффициент β – поправка, позволяющая учесть аэродинамические свойства вагонов составе поезда. Он равен отношению сил аэродинамического сопротивления составов, состоящих из порожних и гружёных полувагонов. Расчёты выполнены для скорости поезда, равной 60 км/ч и скорости ветра 9 м/с и угле между вектором скорости поезда скорости ветра равного 75°, как для наиболее вероятного сценария движения поезда в поле ветровых нагрузок на исследуемом участке из результатов статистической обработки во втором разделе и данных метеостанции:

$$\beta = \frac{F_{c2}}{F_{c1}}, \quad (3.11)$$

где F_{c1} – сила аэродинамического сопротивления состава из порожних полувагонов, Н;

F_{c2} – сила аэродинамического сопротивления состава из гружёных полувагонов, Н.

Подставив ранее полученные значения из таблиц 3.4 и 3.6 получим:

$$\beta = \frac{-27589}{-31003} = 0,9. \quad (3.12)$$

Для состава, состоящего из порожних полувагонов, очевидно, соблюдается равенство $\beta = 1$.

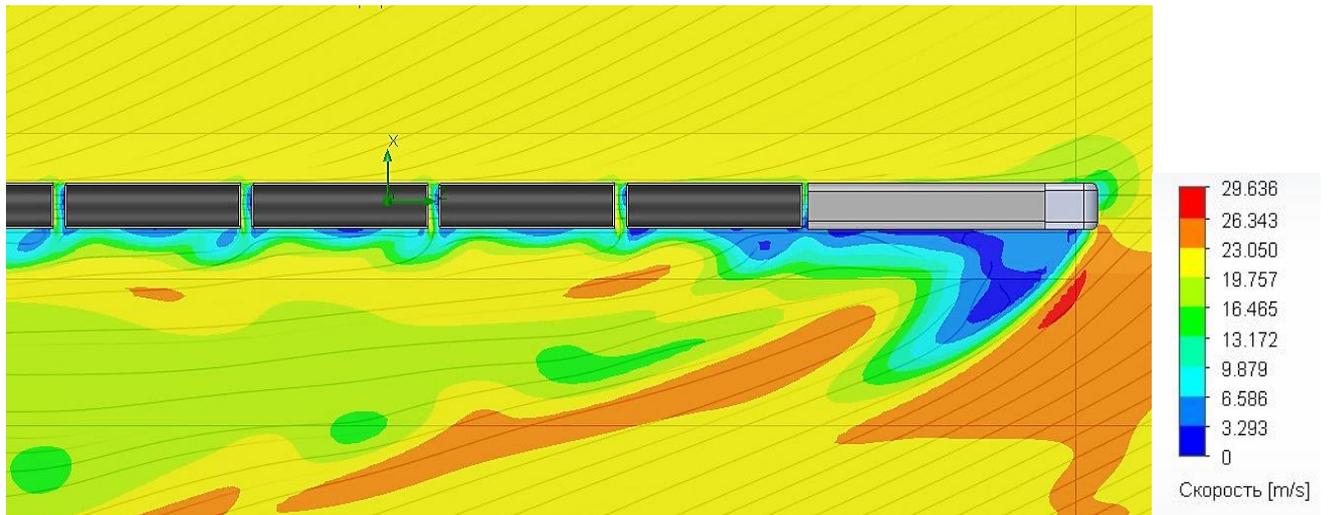
Тогда для сборных поездов, состоящих из примерно одинакового количества порожних и гружёных полувагонов и прочих вагонов с открытыми кузовами, поправка β получена из следующего соотношения:

$$\beta = 1 - \left(\frac{1 - 0,9}{2} \right) = 0,95. \quad (3.13)$$

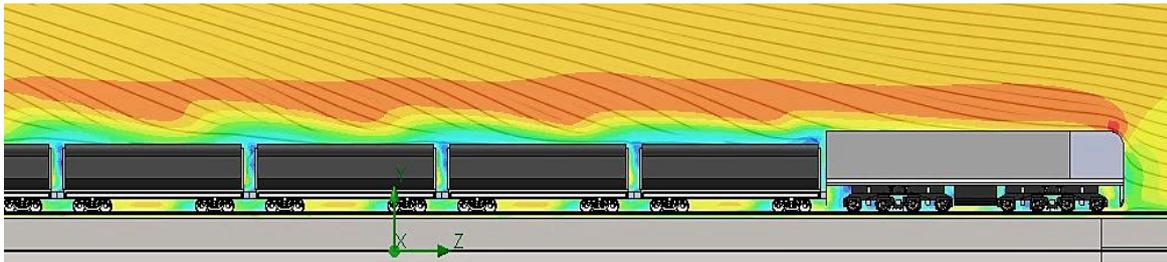
Далее на рисунках 3.19 и 3.20 приведены результаты расчёта поля скоростей воздушного потока и линии тока воздушной среды в горизонтальной плоскости, параллельной оси пути и расположенной на высоте 2 м от уровня головки рельсов, а также в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути и перпендикулярной оси пути при боковом направлении ветрового потока, позволяющие оценить траектории движения воздушных масс при взаимодействии с экипажами гружёного поезда.

Наибольшее влияние на гружёный состав, так же, как и на порожний, оказывает ветровая нагрузка, направленная под углом $60 - 75^\circ$ к оси пути. При этом максимальное значение силы аэродинамического давления смещается ближе к углу направления ветровой нагрузки равному 60° . В остальном характер аэродинамических процессов в гружёном поезде аналогичен тем же процессам, что и в порожнем.

a)



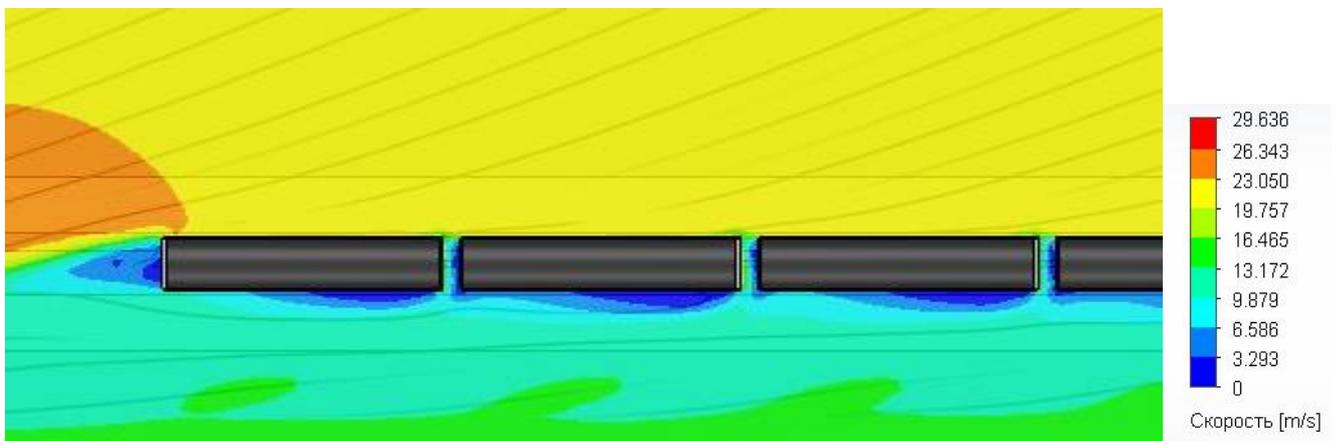
б)



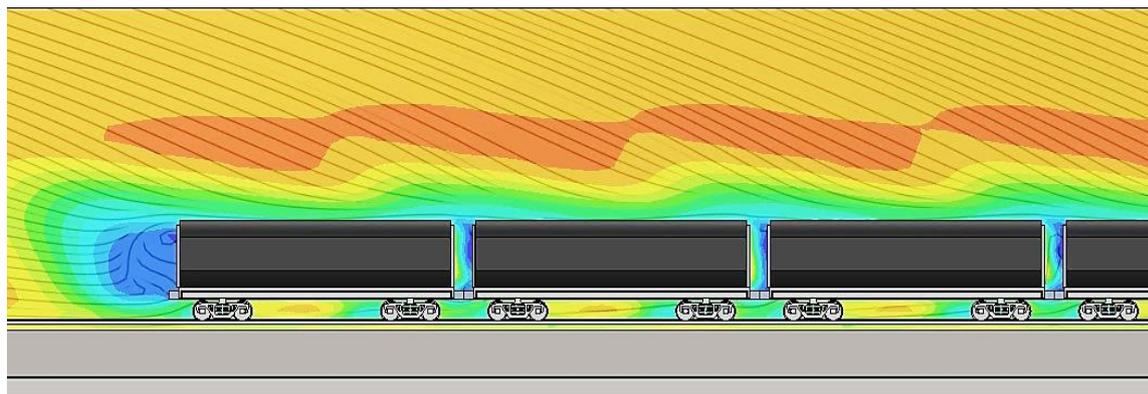
а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

Рисунок 3.19 – Поле скоростей и линии тока в области головной части поезда при угле между векторами скорости поезда и ветрового потока 75°

a)



б)



а – вид сверху; б – разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути

Рисунок 3.20 – Поле скоростей и линии тока в области хвостовой части поезда при угле между векторами скорости поезда и ветрового потока 75°

Аналогичный расчёт был проведен для гружёных вагонов при скорости 60 и 80 км/ч. Анализ результатов показал, что величины сил и характер распределения потоков аналогичен рассмотренному ранее варианту. Величина угла, при которой достигается наибольшее значение величины силы, воздействующей на вагоны поезда, несколько уменьшается.

3.4 Выводы по третьему разделу

1 Выполнена проверка адекватности результатов имитационного моделирования в среде *SOLIDWORKS Flow Simulation* по определению величин аэродинамических сил, действующих на тело, помещённое в воздушный поток. Показано, что полученные результаты соответствуют результатам экспериментальных исследований в достаточной мере для того, чтобы выполнять расчёты по определению сил, возникающих при взаимодействии движущегося поезда и ветрового потока.

2 Разработаны модель и методика для проведения имитационного моделирования по определению аэродинамического сопротивления поезда в приложении *SOLIDWORKS*, состоящего из локомотива и вагонов при воздействии

ветрового потока, позволившие установить зависимости между скоростью движения поезда, скоростью ветра, направлением ветра по отношению к направлению вектора скорости и силами, действующими на вагоны поезда.

3 Выполнен имитационный эксперимент по определению аэродинамического сопротивления поезда и сил, действующих на различные вагоны поезда при воздействии ветрового потока. Установлено, что наибольшая величина силы сопротивления движению, действующей на вагоны, обусловленная ветровой нагрузкой, достигается при величине угла между векторами направления скорости поезда и ветра, составляющим $60 - 75^\circ$. Полученные результаты в достаточной степени соотносятся с результатами, полученными другими авторами в области исследований аэродинамики поезда.

4 Установлен характер изменения величины аэродинамического сопротивления, действующего на различные экипажи поезда, в зависимости от их местоположения в составе. Наибольшая величина силы аэродинамического сопротивления действует на первый экипаж в составе поезда, тогда как экипажи со второго по седьмой имеют наименьшие значения силы сопротивления по сравнению со всем составом из-за эффекта экранирования от первого экипажа. С седьмого экипажа и до последних двух экипажей значения силы становятся примерно равными, что позволяет экстраполировать полученные результаты аэродинамического расчёта на поезда произвольной длины. Также результаты выполненных экспериментов подтверждают зависимость величины аэродинамического сопротивления от степени загруженности для вагонов, которые имеют в своей конструкции открытые полости.

4 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОЕЗДА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВОГО РАСЧЁТА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

4.1 Уравнение движения поезда

Для выполнения расчётов по определению расхода топлива на тягу поезда в работе использована многомассовая модель поезда, [23, 32, 72, 78, 89]. При использовании данной модели каждая единица подвижного состава (вагоны или локомотивы) представляются как сосредоточенные массы, объединённые в единую систему через междувагонные связи, представляющие собой поглощающие аппараты и автосцепки. Применение данной модели (рисунок 4.1) позволяет задать индивидуальные параметры и характеристики для каждого экипажа, в том числе внешние силы, действующие на него при движении.

Движение каждого экипажа описывается следующей системой уравнений [78]:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{S_{i+1} - S_i + \sum F_i}{m_i}, i=\overline{0, n-1}; S_n = 0 \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, i=\overline{1, n-1} \\ v_0 = -\dot{q}_0 \end{cases}, \quad (4.1)$$

где \dot{v}_i – ускорение центра масс i -го экипажа;

S_i – продольная сила, возникающая в i -й междувагонной связи;

m_i – масса i -го экипажа;

n – количество экипажей поезда;

\dot{q}_i – производная от деформации i -й междувагонной связи, равная разности скоростей центров масс соседних экипажей друг относительно друга;

v_i – скорость центра масс i -го экипажа;

ΣF_i – равнодействующая сил тяги, торможения сопротивления движению, действующей на i -й экипаж, найденная по формуле 4.2.

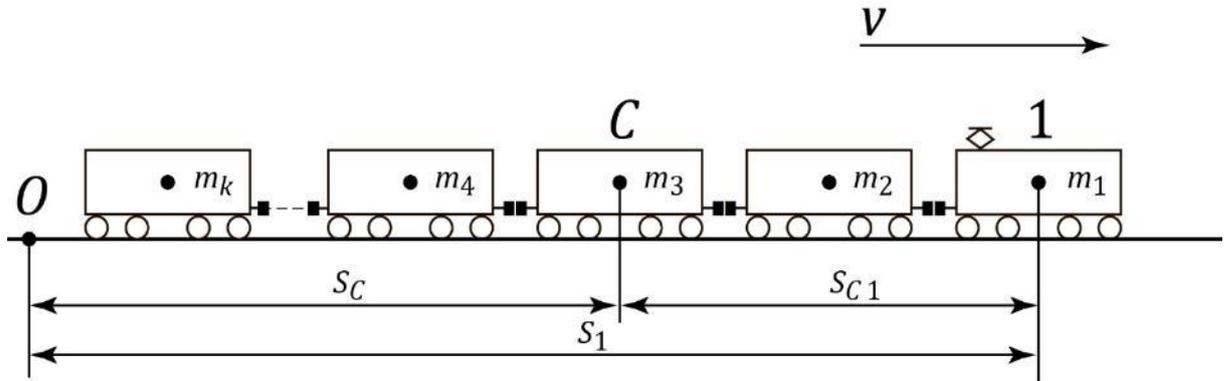


Рисунок 4.1 – Модель поезда для исследования

$$\Sigma F_i = F_{ki} - B_i \pm W_i + S_i - S_{i+1}, \quad (4.2)$$

где F_{ki} – сила тяги, реализуемая i -ым экипажем;

B_i – сила торможения i -го экипажа;

W_i – сила сопротивления движению, действующая на i -й экипаж.

Согласно источнику [78], величину деформации i -й междувагонной связи можно определить, зная координаты центров масс и длины соседних экипажей:

$$q_i = x_i - x_{i-1} - \frac{l_i - l_{i-1}}{2}, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (4.3)$$

где l_i – длина i -го экипажа;

x_i – координата центра масс i -го экипажа.

4.2 Методика учёта сопротивления движению поезда

При движении на поезд действуют внешние силы, препятствующие его перемещению – силы сопротивления. Силы сопротивления движению подразделяются на силы основного и дополнительного сопротивлений движению.

Основное сопротивление движению локомотива $W_{л0}$ вычисляется следующим образом [21]:

$$W_{л0} = (a_0 + b_0 v + c_0 v^2) \cdot m_0, \quad (4.4)$$

где a_0, b_0, c_0 – коэффициенты, которые зависят от серии локомотива, типа пути и режима движения поезда – тяга (электрическое торможение) или выбег;

m_0 – масса локомотива, т.

Величина силы основного сопротивления движению вагонов W_0 вычисляется по следующей формуле:

$$W_{0i} = \left(a_{1i} + \frac{b_{1i} + c_{1i} \cdot v_i + d_{1i} \cdot v_i^2}{q_{0i}} \right) \cdot m_i, \quad (4.5)$$

где $a_{1i}, b_{1i}, c_{1i}, d_{1i}$ – коэффициенты, зависящие от типа буксового узла вагона, его загруженности, характеристик пути для i -го экипажа, и принимаются в соответствии с начальными условиями;

q_{0i} – осевая нагрузка i -го экипажа, т/ось;

m_i – масса i -го экипажа, т.

Известно, что составляющие формул (4.4) и (4.5) при v^2 соответствуют аэродинамической составляющей сопротивления движению. При наличии ветровой нагрузки были использованы следующие формулы, полученные из формул (4.4) и (4.5) путём исключения составляющей аэродинамического сопротивления и добавлением значений воздушного сопротивления, полученных в результате расчётов, подробно рассмотренных в предыдущем разделе:

$$W_{л0} = (a_0 + b_0 v) \cdot m_0 + W_{вл} \quad (4.6)$$

$$W_{0i} = \left(a_{1i} + \frac{b_{1i} + c_{1i} \cdot v_i}{q_{0i}} \right) \cdot m_i + W_{ви}, \quad (4.7)$$

где $W_{вл}, W_{ви}$ – расчётные значения сопротивления воздушной среды для локомотива и i -го вагона. Данные составляющие определены в результате выполнения аэродинамического расчёта для различных скоростей движения подвижного состава, ветра и угла между направлением ветрового потока, и скорости движения поезда в соответствии со следующей методикой.

Как было показано в разделе 3, величина сопротивления воздушной среды, действующей на i -й экипаж, является функцией четырёх переменных, а именно:

$$W_i = f(i, \alpha, v_{\text{п}}, v_{\text{в}}), \quad (4.8)$$

где i – номер экипажа в составе поезда;

$v_{\text{п}}$ – скорость движения поезда;

$v_{\text{в}}$ – скорость ветра;

α – угол между векторами скорости движения поезда и ветрового потока.

Таким образом, для отыскания величины силы аэродинамического сопротивления, действующей на экипажи в каждый момент времени движения поезда, необходимо было бы на основании результатов расчётов, выполненных в разделе 3, найти аналитическое выражение, устанавливающее взаимосвязь между функцией W_i и её аргументами $i, \alpha, v_{\text{п}}, v_{\text{в}}$. Отыскание величины силы, действующей на экипаж, сводилось бы к подстановке в найденное выражение величин аргументов и выполнению необходимых несложных вычислений.

Вместе с этим решение задачи по нахождению аппроксимирующего выражения для функции, определённой в пятимерном пространстве, несёт в себе известные сложности, поэтому в работе предложена упрощённая методика решения задачи определения величины сопротивления ветрового потока при любом направлении и скорости ветра и скорости движения поезда.

На первом этапе результаты расчётов, определённые в пятимерной области пространства, полученные в разделе 3, были сгруппированы следующим образом. Из исходного набора данных по признаку номера экипажа в поезде i были выделены четыре четырёхмерных поднабора W^k , где k – номер группы экипажей (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Четырёхмерный поднабор групп экипажей

Диапазон номеров экипажей i	1	2..4	5..($N - 1$)	N
Номер поднабора k	1	2	3	4

На втором этапе из каждого k -го поднабора W^k были выделены трёхмерные наборы $W^{k,n}$, сгруппированные по признаку n величины угла α между вектором скорости движения поезда $v_{\text{п}}$ и скоростью ветра $v_{\text{в}}$.

Таблица 4.2 – Массив значений величины угла α между вектором скорости движения поезда $v_{\text{п}}$ и скоростью ветра $v_{\text{в}}$

α	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	...	180°
n	1	2	3	4	5	6	7		13

Таким образом, после завершения второго этапа подготовки получены $(k \times n)$, трёхмерных поднаборов данных $W^{k,n}$, содержащих информацию о скорости движения поезда, скорости ветра (аргументы), и величине силы, действующей на экипаж поезда (значение функции). Содержимое каждого из этих поднаборов может быть представлено в виде поверхности, расположенной в пространстве $v_{\text{п}}, v_{\text{в}}, W_i$ и образованной треугольниками с вершинами в точках с координатами, соответствующих рассчитанным значениям сил сопротивления при заданных величинах скорости ветра и скорости поезда. Каждому значению величины угла между векторами скоростей поезда и воздушного потока соответствует одна поверхность, таким образом, для каждого диапазона номеров экипажей может быть построено семейство поверхностей, соответствующих различным направлениям ветра. В качестве примера на рисунке 4.2 приведены поверхности, построенные по данным, полученным в результате выполнения расчётов, выполненных в разделе 3, для величин углов, при которых достигается максимальное 75° и минимальное 180° , значение силы сопротивления [15].

В процессе имитационного моделирования при выполнении расчётов известны скорость движения поезда, его координата, скорость и направление ветра. С использованием этих данных, а также информации о направлении трассы железнодорожного пути, можно определить мгновенное значение угла между направлением вектора скорости поезда или каждого экипажа.

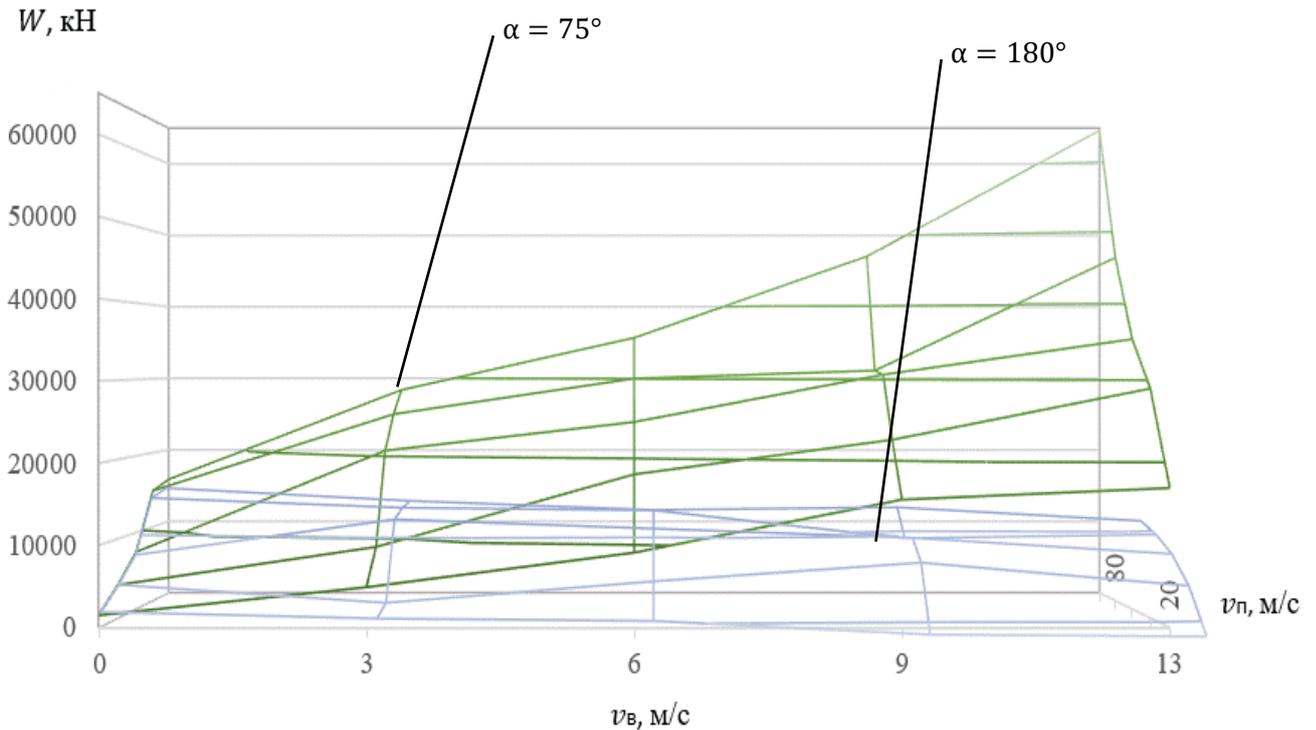


Рисунок 4.2 – Зависимость аэродинамического сопротивления, действующего на поезд, от скорости поезда и скорости ветра

В связи с этим, порядок определения силы аэродинамического сопротивления, действующей на каждый экипаж, принят следующим.

По известным номеру экипажа i и величине угла α между направлениями движения поезда $v_{п}^{\alpha}$ и ветра $v_{в}^{\alpha}$ выбирается совокупность данных для построения поверхностей с целью последующего анализа. Для построения из набора выбираются поверхности, соответствующие углам α_1 и α_2 , являющимся соседними к фактическому значению угла α . То есть, если $\alpha = 18^\circ$, то для построения выбираются совокупности данных, соответствующие $\alpha_1 = 15^\circ$ и $\alpha_2 = 30^\circ$.

Далее, по известным $v_{п}^{\alpha}$ и $v_{в}^{\alpha}$ следует определить третьи координаты точек X' и X'' , лежащих в плоскости треугольников $A'B'C'$ и $A''B''C''$ (рисунок 4.3), каждый из которых построен по результатам расчётов с использованием набора данных, соответствующих углам α_1 и α_2 (раздел 3). Для этого вначале необходимо известными из курса аналитической геометрии методами определить уравнения плоскостей, содержащих треугольники $A'B'C'$ и $A''B''C''$:

$$L_1 \cdot v_{\Pi}^{\alpha 1} + M_1 \cdot v_B^{\alpha 1} + P_1 \cdot F^{\alpha 1} + Q_1 = 0, \quad (4.9)$$

где F^{α} – сила, действующая на экипаж поезда, Н.

$$L_2 \cdot v_{\Pi}^{\alpha 2} + M_2 \cdot v_B^{\alpha 2} + P_2 \cdot F^{\alpha 2} + Q_2 = 0. \quad (4.10)$$

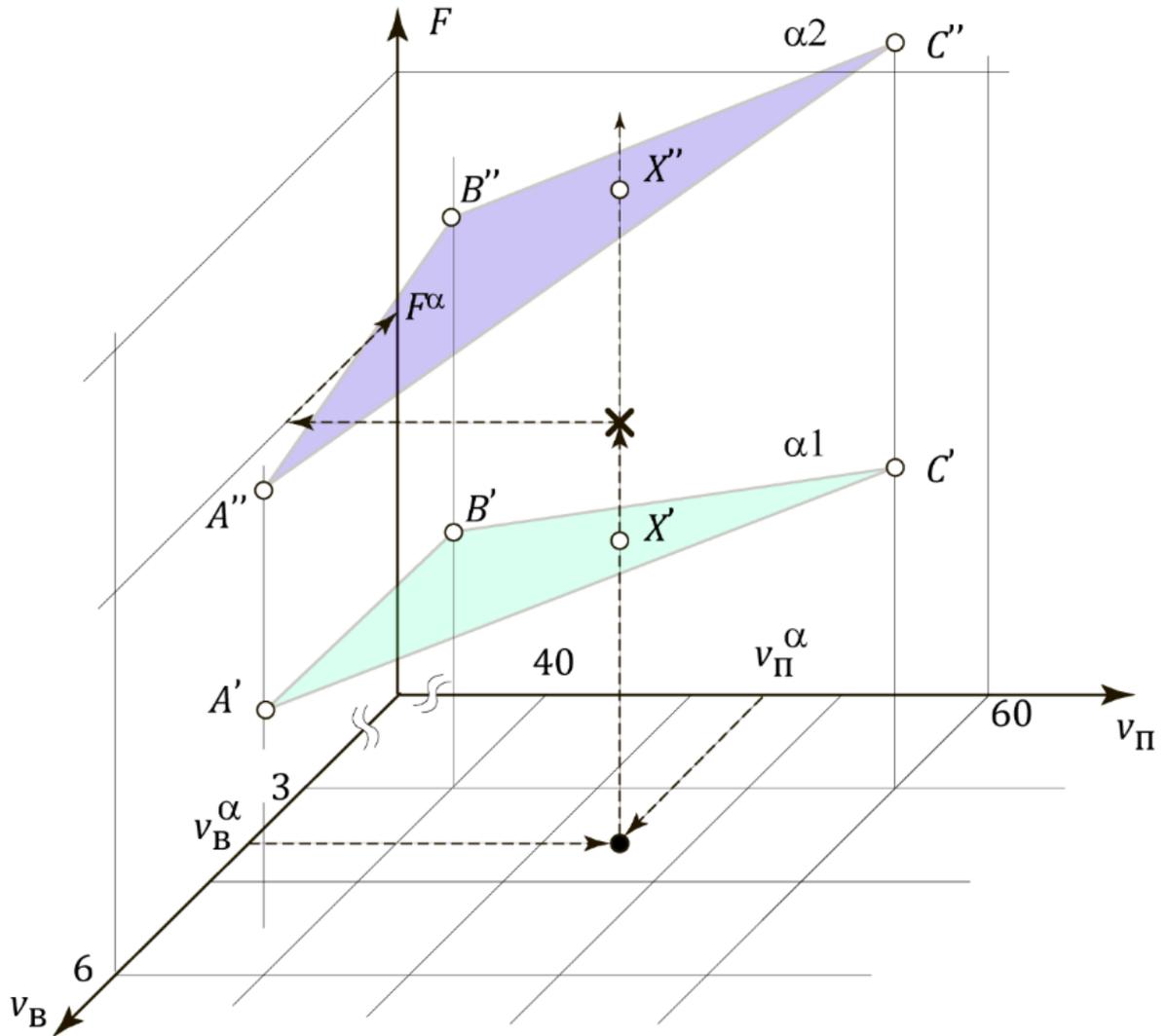


Рисунок 4.3 – Нахождение данных для расчетов из имеющихся совокупностей поверхностей

Координаты $v_{\Pi}^{\alpha 1,2}$, $v_B^{\alpha 1,2}$ и $F^{\alpha 1,2}$ вершин треугольников $A'B'C'$ и $A''B''C''$ выбираются таким образом, чтобы координаты v_{Π}^{α} и v_B^{α} искомой точки лежали

между точками, являющимися проекциями координат вершин треугольников на координатные плоскости.

Отсюда:

$$F^{\alpha 1} = \frac{-(L_1 \cdot v_{\Pi}^{\alpha 1} + M_1 \cdot v_{\text{В}}^{\alpha 1} + Q_1)}{P_1}; \quad (4.11)$$

$$F^{\alpha 2} = \frac{-(L_2 \cdot v_{\Pi}^{\alpha 2} + M_2 \cdot v_{\text{В}}^{\alpha 2} + Q_2)}{P_2}. \quad (4.12)$$

По найденным значениям сил $F^{\alpha 1}$ и $F^{\alpha 2}$, можно определить силу F^{α} из следующего соотношения:

$$F^{\alpha} = \frac{\alpha - \alpha 1}{\alpha 2 - \alpha 1} \cdot (F^{\alpha 2} - F^{\alpha 1}) + F^{\alpha 1}. \quad (4.13)$$

Найденная таким способом величина силы, действующей на экипаж поезда F^{α} используется в формулах (4.6) и (4.7) как величина силы аэродинамического сопротивления.

Как было отмечено в первом разделе, что для выполнения исследований по изучению влияния ветровой нагрузки на подвижной состав принят участок Палласовка – Верхний Баскунчак Приволжской ж. д. Профиль пути исследуемого участка представлен в таблице 4.3. Как видно из таблицы 4.3, участок расположен на равнинной местности с незначительным перепадом высот, отсутствуют кривые малого радиуса, что позволяет поддерживать постоянную скорость при движении с поездом. Выполненный анализ записей регистраторов параметров движения локомотивов, обращающихся на этом участке, показал, что движение поездов происходит примерно с постоянной скоростью движения, равной значению технической скорости. В процессе движения поезда делают минимум две остановки на станциях Кайсацкая и Ингеловский, в которых осуществляется таможенный контроль при пересечении государственной границы между Российской Федерацией и Республикой Казахстан.

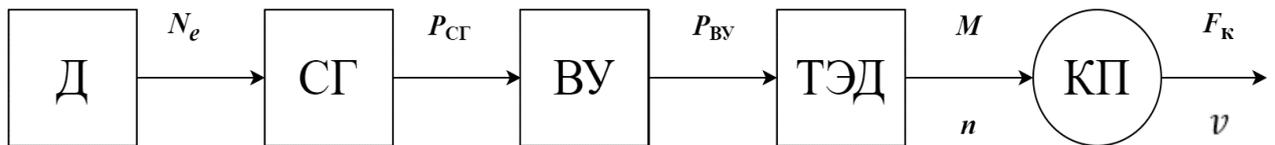
Таблица 4.3 – Профиль пути на участке Палласовка – Верхний Баскунчак

Заданный профиль пути				Примечание
№ элемента	$i, ‰$	Длина S , м	Кривая	Станции
1	0	2000		Палласовка
2	+2,2	1000		
3	+2	31000		Калашниковский
4	+4,1	1000		Кайсацкая
5	0	1000		
6	+3	1000		Коммунистический
7	0	56000	$R=2130$ $S=460$	Джаныбек Ингеловский
8	+4,1	4000		
9	-3	5000		Эльтон
10	0	2000	$R=1070$ $S=412$	
11	+3	6000		
12	+3,2	9000	$R=2181$ $S=477$	
13	0	3000		Полынный
14	-2	3000		
15	0	7000		
16	-1,6	1000	$R=2055$ $S=637$	
17	0	3000		
18	+1,5	1000		Сайхин
19	0	2000		
20	-2,6	1000		
21	+2	1000		
22	0	1000		
23	+0,6	4000		
24	0	10000	$R=2170$ $S=715$	Равнинный
25	-4	2000		
26	+2,3	1000		
27	0	6000		
28	+3,5	4000		Шунгай
29	0	29000		Молодость Шунгули
30	-5,5	2000		
31	+4	1000		
32	0	1000		Верхний Баскунчак

Время в пути при движении с поездом со скоростью равной средней технической составляет 4 часа.

4.3 Модель передачи мощности тепловоза и определение расхода топлива

Определение расхода топлива было выполнено путём обратного моделирования энергетической цепи тепловоза с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока, функциональная схема которой приведена на рисунке 4.4.

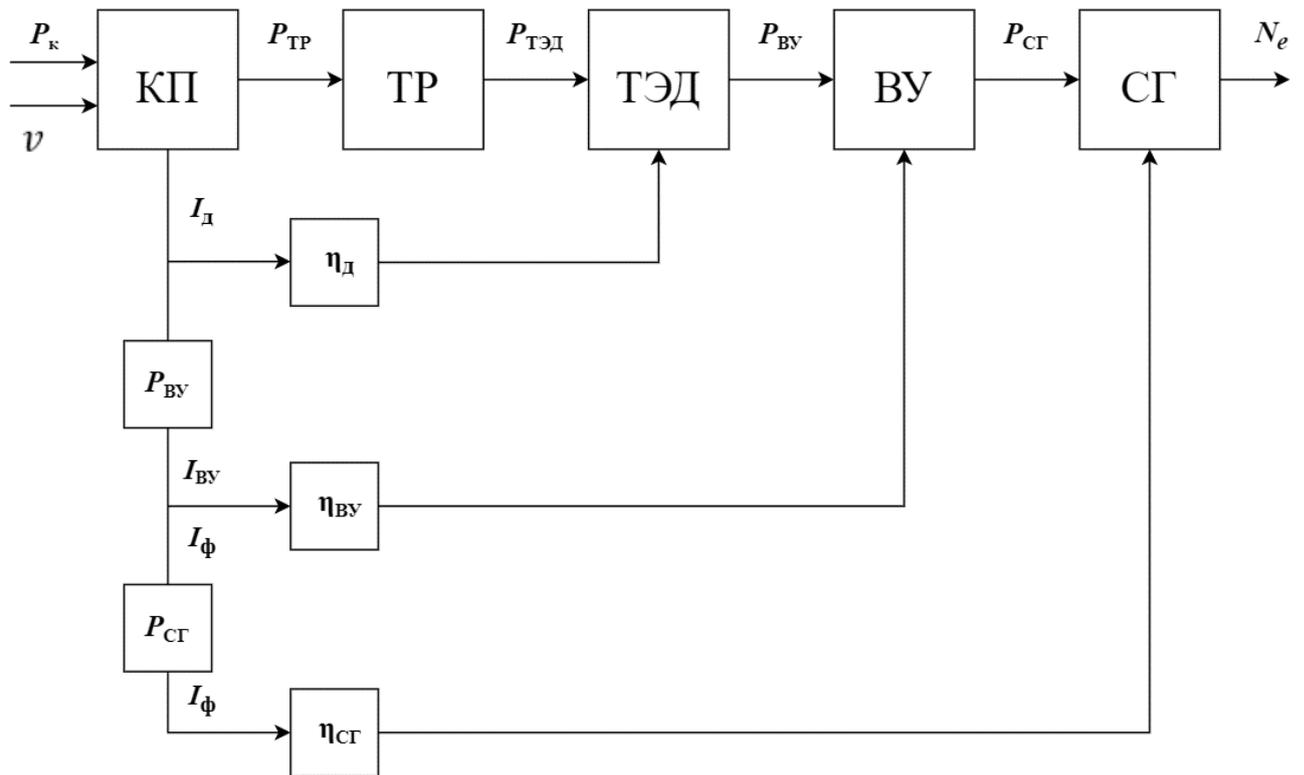


Д – дизель; СГ – синхронный генератор; ВУ – выпрямительная установка; ТЭД – тяговые электродвигатели; КП – колёсные пары; N_e – эффективная мощность дизеля; $P_{СГ}$ – мощность синхронного генератора; $P_{ВУ}$ – мощность на выходе выпрямительной установки; M – крутящий момент на валу якоря ТЭД; n – частота вращения якоря ТЭД; F_k – касательная сила тяги; v – скорость движения

Рисунок 4.4 – Схема электрической передачи постоянно-переменного тока тепловоза

Сигнал N_e на выходе дизеля соответствует его эффективной мощности, пропорциональной частоте вращения коленчатого вала и моменту на валу. Дизель вращает вал синхронного генератора, который преобразует механическую энергию дизеля в электрическую $P_{СГ}$ и питает выпрямительную установку. Выпрямительная установка преобразует переменный ток генератора в постоянный для питания тяговых электродвигателей $P_{ВУ}$. Тяговые электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую (крутящий момент M на валу якоря и частота вращения якоря n) и передают ее на колесные пары, которые реализуют касательную силу тяги F_k [46, 98].

Для определения мгновенного (рисунок 4.5) и среднего расхода топлива дизель-генераторной установкой необходимо определить мощность генератора и, соответственно, эффективную мощности дизеля, для чего необходимо смоделировать обратную цепочку передачи мощности тепловоза [41].



КП – колёсные пары; ТР – тяговые редукторы; ТЭД – тяговые электродвигатели; ВУ – выпрямительная установка; СГ – синхронный генератор; N_e – эффективная мощность дизеля; $P_{СГ}$ – мощность синхронного генератора; $P_{ВУ}$ – мощность на выходе выпрямительной установки; $P_{ТЭД}$ – мощность, подведённая к ТЭД; $P_{ТР}$ – мощность на валу малой шестерни тягового редуктора; P_k – касательная мощность; v – скорость движения; I_d – ток ТЭД; η_d – КПД ТЭД; $I_{ВУ}$ – ток ВУ; $\eta_{ВУ}$ – КПД ВУ; I_ϕ – ток фазы СГ; $\eta_{СГ}$ – КПД СГ

Рисунок 4.5 – Схема передачи мощности тепловоза

В соответствии с представленной схемой, исходными данными для расчёта являются величины скорости движения поезда и силы тяги локомотива: $v(s)$ и $F_k(s)$, которые могут быть определены по результатам выполнения тягового расчёта (рисунок 4.6, 4.7).

Далее, с использованием полученных зависимостей вычисляется величина касательной мощности тепловоза. В блоке ТР – тяговые редукторы, учитываются потери энергии в тяговой передаче тепловоза, в блоке ТЭД потери энергии в тяговых электродвигателях, в блоке ВУ – в выпрямительной установке тепловоза и блоке СГ в синхронном генераторе.

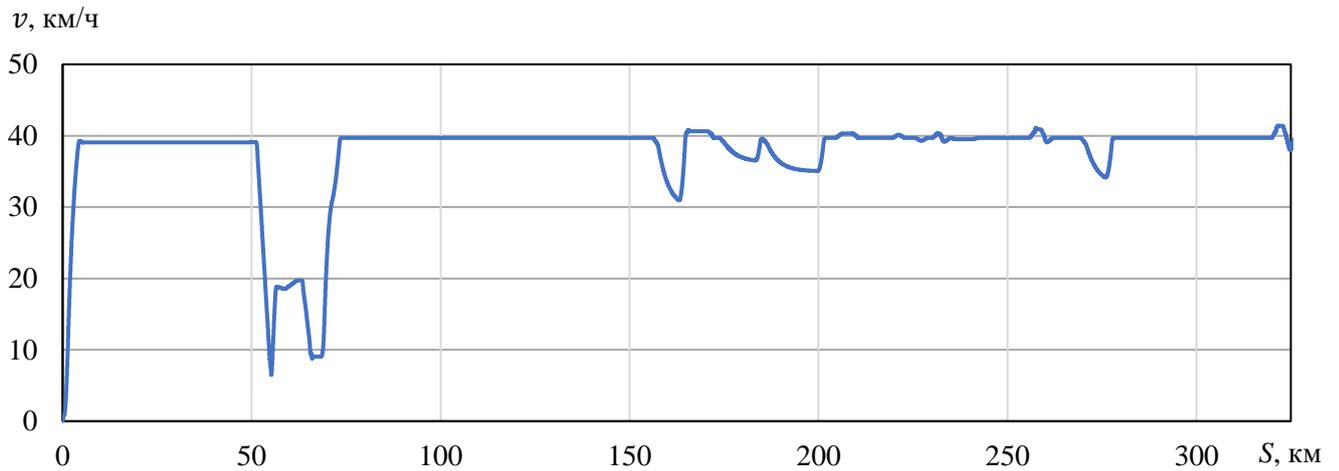


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости движения поезда от пройденного расстояния

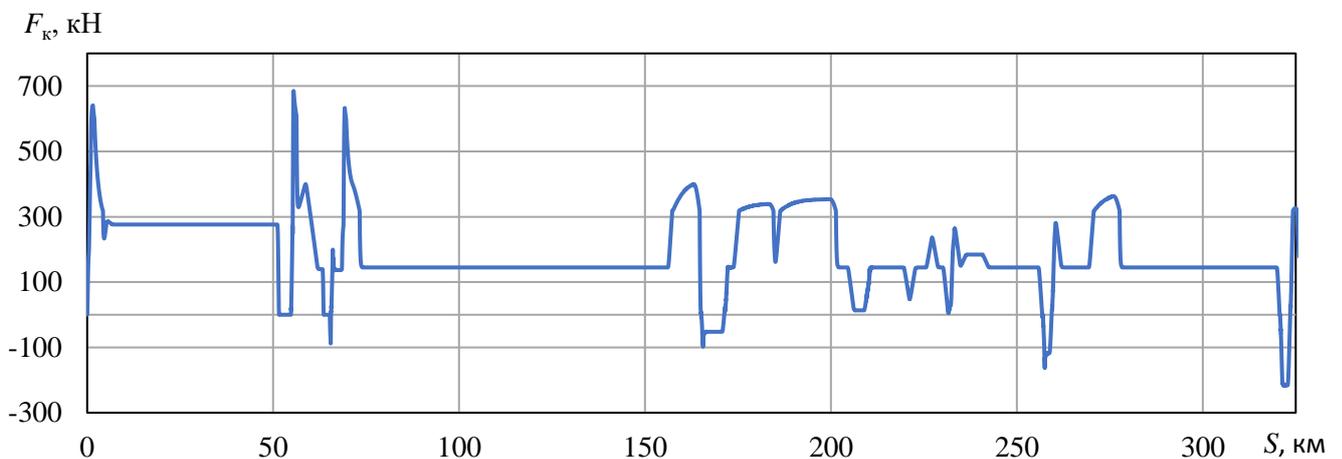


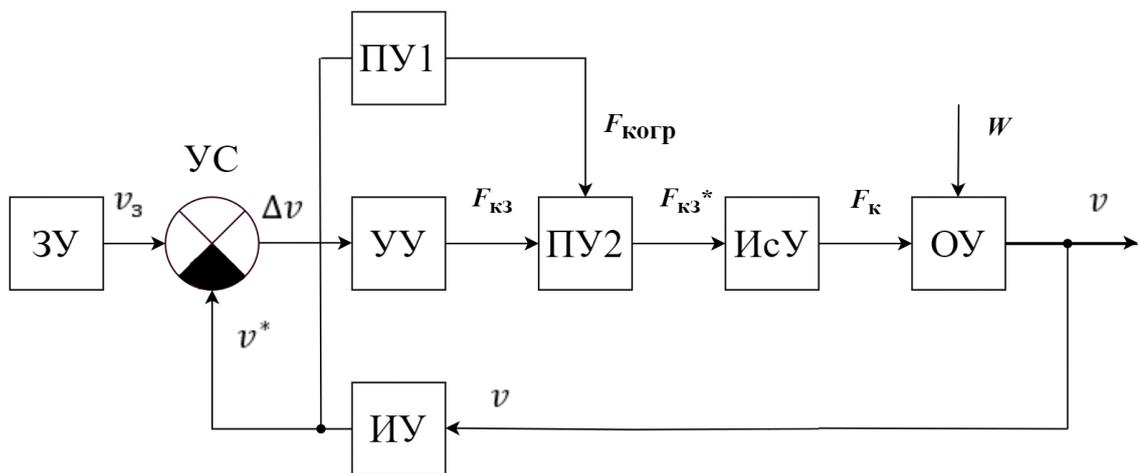
Рисунок 4.7 – Зависимость касательной силы тяги локомотива от пройденного расстояния

Выходными величинами данных блоков являются соответственно мощность на валу малой шестерни $P_{Тр}$, подведённая к тяговым двигателям электрическая мощность $P_{ТЭД}$, мощность на входе выпрямительной установки $P_{ВУ}$, механическая мощность на валу синхронного генератора $P_{СГ}$. Величины потерь в ряде элементов энергетической цепи зависят от параметров работы оборудования локомотива (скорость движения, ток тяговых двигателей, напряжение на его зажимах) [31, 88]. Для определения величин потерь в этих элементах предназначены блоки η_D , $\eta_{ВУ}$, $\eta_{СГ}$.

Далее рассмотрена более подробно модель передачи мощности. Как видно, исходными данными для расчёта являются величины силы тяги F_k и скорости

движения поезда v . Данные величины найдены в результате выполнения тягового расчёта по моделированию движения грузового поезда по участку, с учётом особенностей плана и профиля рассматриваемого в работе тягового плеча Приволжской железной дороги, а также режимов движения поездов по нему.

С учётом особенностей участка и результатов анализа режимов движения поезда (равнинный профиль и движение с постоянной скоростью) для определения силы тяги, необходимой для движения поезда с заданной скоростью при действии переменных возмущающих сил, в работе использован автоматический регулятор скорости движения поезда [70], работающий в режиме стабилизации скорости. Функциональная схема простейшей системы автоматического управления скоростью приведена на рисунке 4.8.



ЗУ – задающее устройство; УС – устройство сравнения; v_3 – величина заданной ЗУ скорости; v^* – величина фактической измеренной скорости; Δv – рассогласование скоростей; ИУ – измерительное устройство; УУ – устройство управления; $F_{кз}$ – заданное УУ значение силы тяги для ликвидации рассогласования по скорости; ПУ1 – промежуточное устройство, вводящее в систему сигнал $F_{когр}$; $F_{когр}$ – ограничение тяговой характеристики; ПУ2 – промежуточное устройство, выбирающее минимальное из двух сигналов $F_{кз}$ и $F_{когр}$, и формирующее сигнал $F_{кз}^*$; $F_{кз}^*$ – заданная величина силы тяги на вход ИсУ, скорректированная ПУ2; ИсУ – исполнительное устройство; F_k – величина силы тяги, воздействующая на ОУ; ОУ – объект управления; W – возмущающие силы, действующие на ОУ

Рисунок 4.8 – Упрощенная функциональная схема САУ регулятора скорости

Схема содержит следующие элементы: задающее устройство, вводящее в систему сигнал v_3 , пропорциональный заданной скорости движения поезда;

устройство сравнения, вычисляющее рассогласование Δv между заданным v_3 и фактическим v значением скорости движения; устройство управления, вычисляющее заданное значение силы тяги $F_{кз}$, направленное на ликвидацию рассогласования по скорости Δv . Устройство управления реализует пропорционально-интегральный закон управления:

$$x(t) = k_1 \Delta v(t) + k_2 \int_0^t \Delta v(t) dt, \quad (4.14)$$

где k_1, k_2 – параметры закона управления, найденные по результатам выполнения пробных расчётов.

Сигнал $F_{кз}$ с выхода устройства управления поступает на вход промежуточного устройства 2, выбирающего минимальный из двух входных сигналов $F_{кз}$ и $F_{когр}$. Сигнал $F_{когр}$ представляет собой величину ограничения на тяговую характеристику при данной скорости. Величина заданной силы тяги $F_{кз}^*$ с выхода ПУ2 поступает на вход исполнительного устройства, представляющего собой тяговый привод локомотива. Выходным сигналом тягового привода является величина силы тяги, оказывающая непосредственное воздействие на объект управления – поезд. Величина v^* с выхода измерительного устройства, пропорциональная фактической скорости движения, поступает на второй вход устройства сравнения, где используется для вычисления рассогласования.

При разработке модели и выполнении расчётов сделано допущение, что величина силы тяги, реализуемая локомотивом, может принимать любое значение, ограниченное тяговыми характеристиками, соответствующими наибольшей мощности ДГУ на 15-й позиции контроллера (рисунок 4.9) [47].

Величина касательной мощности тепловоза P_k определена как произведение величин силы тяги F_k и скорости движения v :

$$P_k = F_k v. \quad (4.15)$$

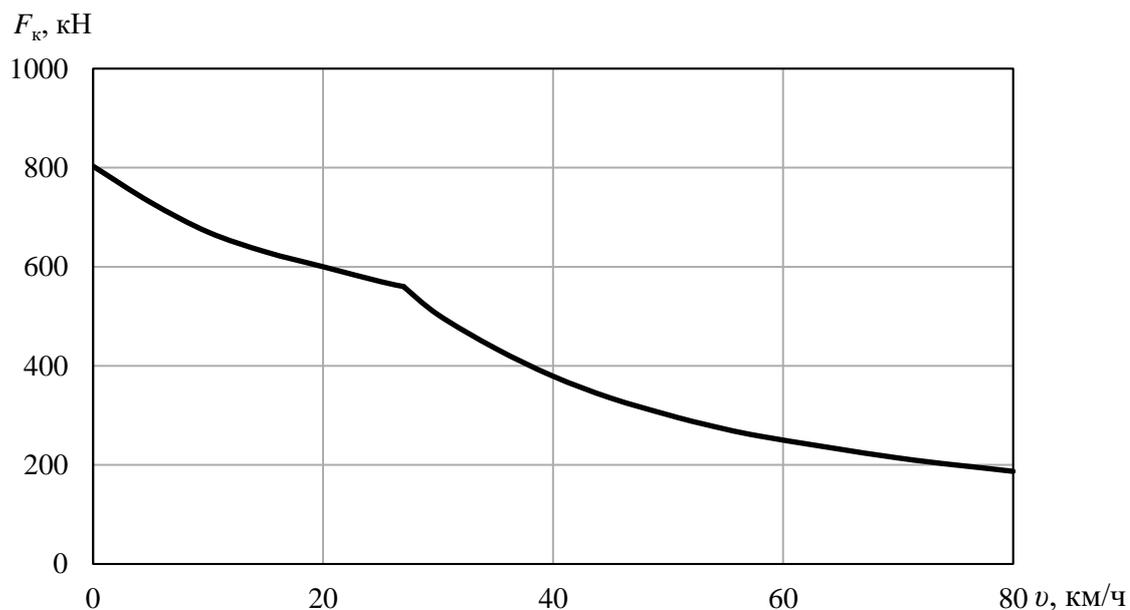


Рисунок 4.9 – Тяговая характеристика тепловоза на 15 позиции контроллера машиниста

Мощность на валу тягового электродвигателя будет равна:

$$P_{\text{ТР}} = \frac{P_{\text{к}}}{\eta_{\text{ТР}} \cdot 12}, \quad (4.16)$$

где $\eta_{\text{ТР}}$ – КПД колесно-моторного блока тепловоза, при расчетах принят равным 0,98.

Для того, чтоб выполнить алгоритм расчета, представленный на рисунке 4.5 и определить ток $I_{\text{д}}$ и КПД $\eta_{\text{д}}$ тягового двигателя необходимо обратиться к электромеханическим и электротяговым характеристикам тягового электродвигателя ЭД133 из справочника [9].

Для удобства работы характеристики аппроксимированы полиномиальной функцией четвертой степени при помощи метода наименьших квадратов. Характеристики представлены на рисунках 4.10 – 4.13. Выражения с полиномами степенной функции для всех ступеней регулирования возбуждения представлены под графиками.

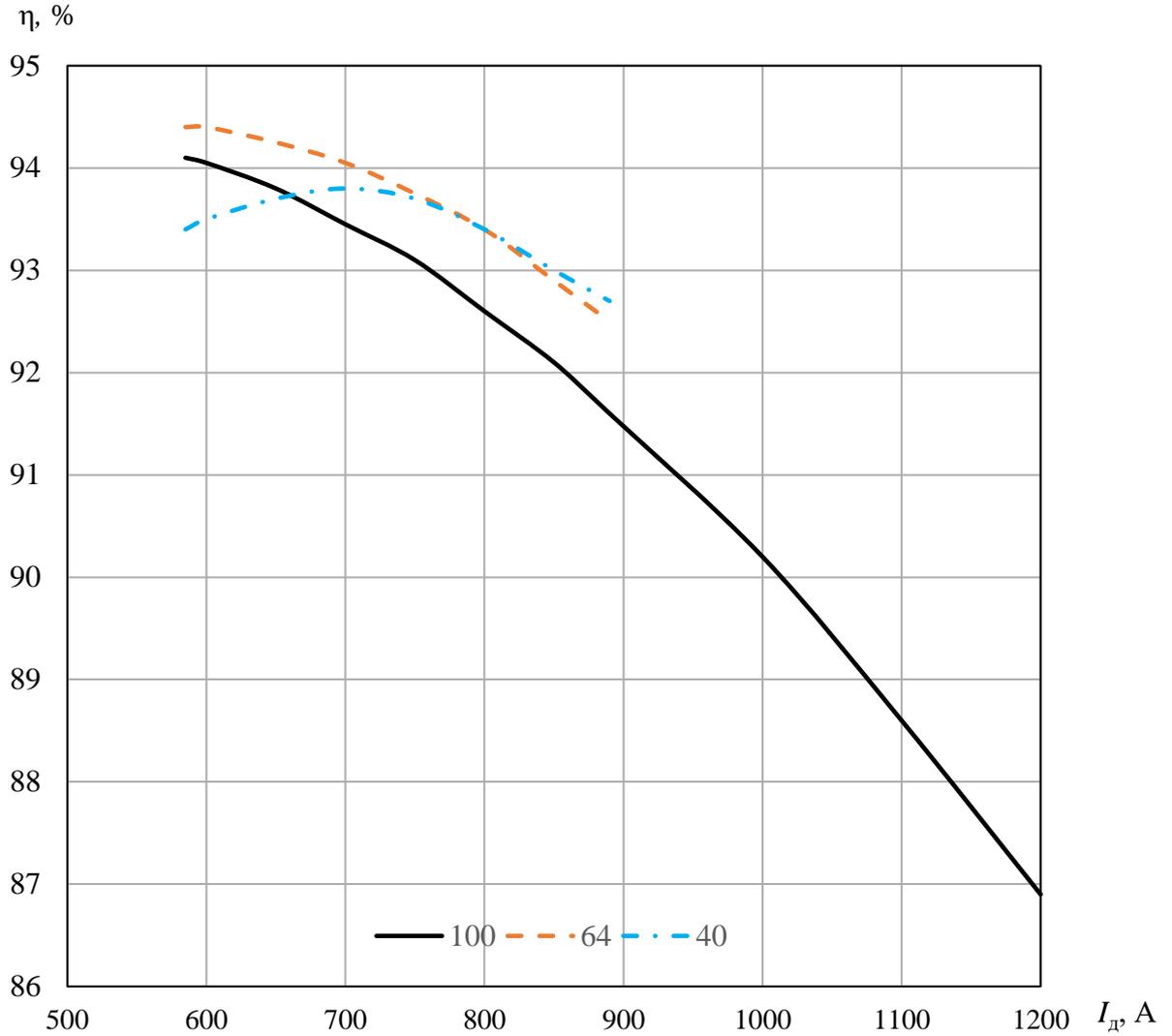


Рисунок 4.10 – Характеристика КПД тягового двигателя ЭД133

Полиномы аппроксимирующей функции для графиков полного (100 %) и ослабленного (64 % и 40 %) возбуждения тягового двигателя представлены выражениями 4.17 – 4.19:

100 %:

$$y = 8 \cdot 10^{-14}x^4 + 10^{-10}x^3 - 2 \cdot 10^{-6}x^2 + 2 \cdot 10^{-3}x + 0,91; \quad (4.17)$$

64 %:

$$y = 5 \cdot 10^{-11}x^4 - 2 \cdot 10^{-8}x^3 + 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 7 \cdot 10^{-3}x + 1,05; \quad (4.18)$$

40 %:

$$y = 4 \cdot 10^{-9}x^3 - 10^{-5}x^2 + 10^{-2}x + 0,66. \quad (4.19)$$

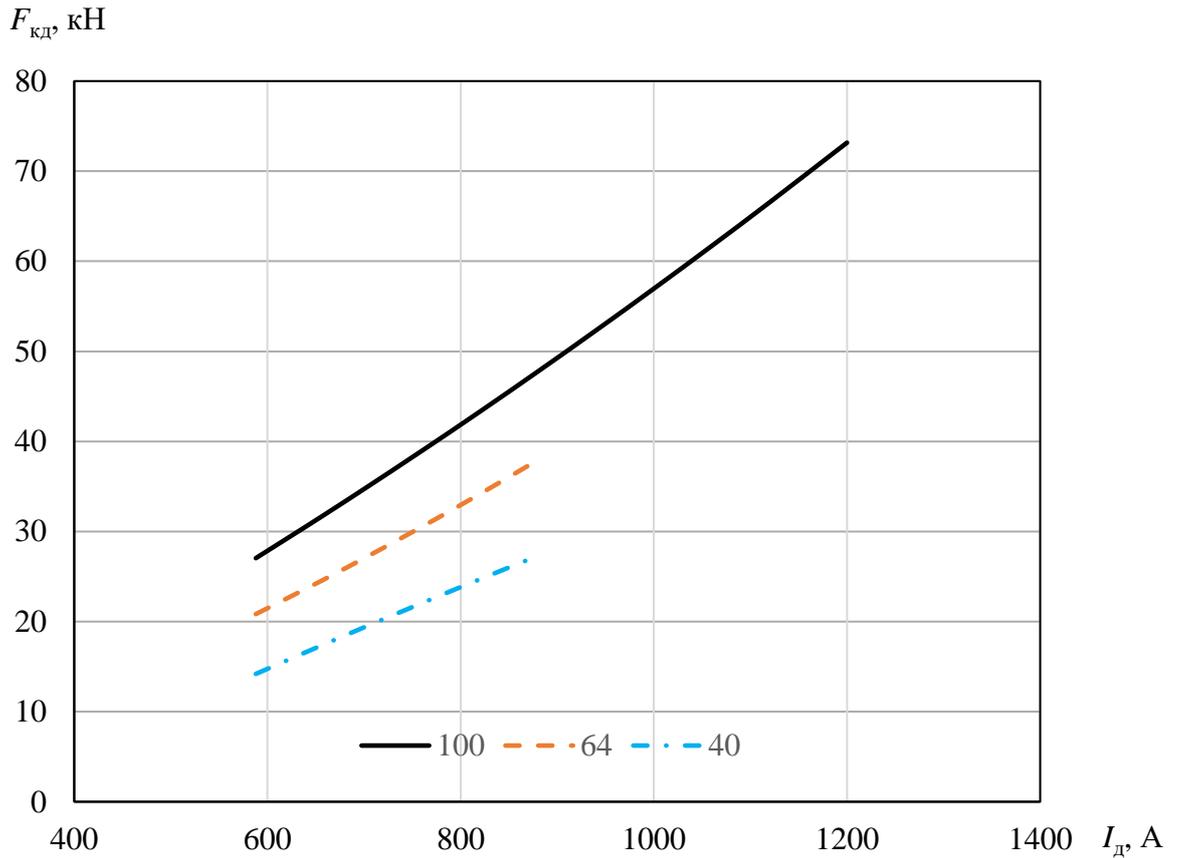


Рисунок 4.11 – Электротяговые характеристики двигателя ЭД133

Полиномы аппроксимирующей функции для графиков полного (100 %) и ослабленного (64 % и 40 %) возбуждения тягового двигателя представлены выражениями 4.20 – 4.22:

100 %:

$$y = -4 \cdot 10^{-18}x^4 + 2 \cdot 10^{-14}x^3 + 0,014x^2 + 50,8x - 7561; \quad (4.20)$$

64 %:

$$y = -7 \cdot 10^{-17}x^4 + 2 \cdot 10^{-13}x^3 + 0,018x^2 + 31,6x - 4109; \quad (4.21)$$

40 %:

$$y = -2 \cdot 10^{-6}x^4 + 6 \cdot 10^{-3}x^3 - 0,72x^2 + 402x - 78107. \quad (4.22)$$

Электрическая мощность двигателя:

$$P_{ТЭД} = \frac{P_{ТР}}{\eta_D}, \quad (4.23)$$

где η_D – КПД тягового электродвигателя, величина которого определяется по характеристике, представленной на рисунке 4.12.

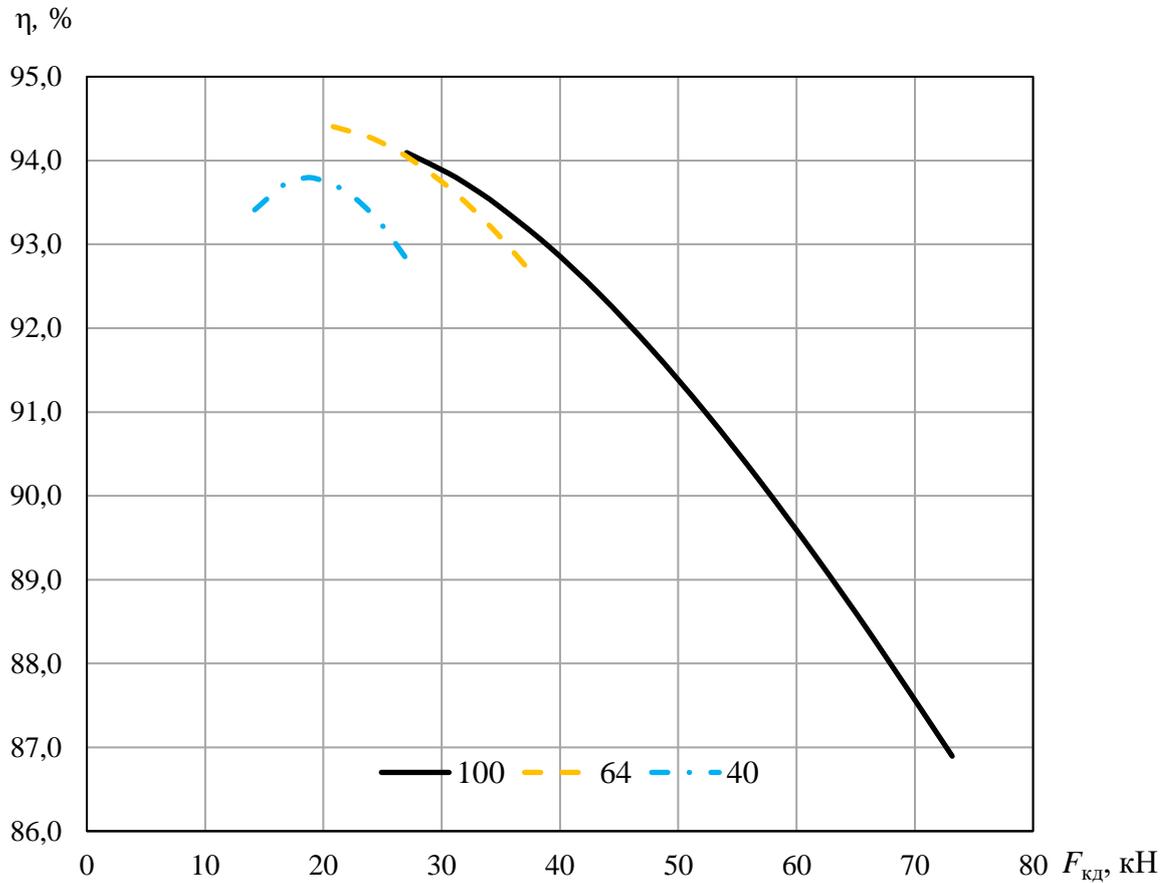


Рисунок 4.12 – Зависимость КПД тягового двигателя ЭД133 от силы тяги на всех ступенях возбуждения

Полиномы аппроксимирующей функции для графиков полного (100 %) и ослабленного (64 % и 40 %) возбуждения тягового двигателя представлены выражениями 4.24 – 4.26:

100 %:

$$y = -2 \cdot 10^{-19}x^4 + 4 \cdot 10^{-14}x^3 - 4 \cdot 10^{-9}x^2 + 10^{-4}x + 0,86; \quad (4.24)$$

64 %:

$$y = -2 \cdot 10^{-20}x^4 + 5 \cdot 10^{-15}x^3 - 7 \cdot 10^{-9}x^2 + 2 \cdot 10^{-5}x + 0,93; \quad (4.25)$$

40 %:

$$y = -6 \cdot 10^{-20}x^4 + 10^{-14}x^3 - 10^{-9}x^2 + 6 \cdot 10^{-5}x + 0,92. \quad (4.26)$$

Для вычисления в соответствии с приведённым алгоритмом величины КПД двигателей необходимо отыскать зависимость $\eta(F_{кд})$. Для решения данной задачи необходимо воспользоваться электромеханическими характеристиками двигателя, по характеристикам $M_d(I_d)$ и $\eta(I_d)$ определив зависимость $\eta(M_d)$, от которой можно перейти к зависимости $\eta(F_{кд})$ [74]. Данные зависимости построены для всех позиций регулирования возбуждения тяговых двигателей (рисунок 4.12).

При выполнении расчётов величина силы тяги одного колёсно-моторного блока $F_{кд}$ определена по известной величине силы тяги тепловоза F_k :

$$F_{кд} = \frac{F_k}{12}. \quad (4.27)$$

Также была построена характеристика $I_d(F_{кд})$ (рисунок 4.13).

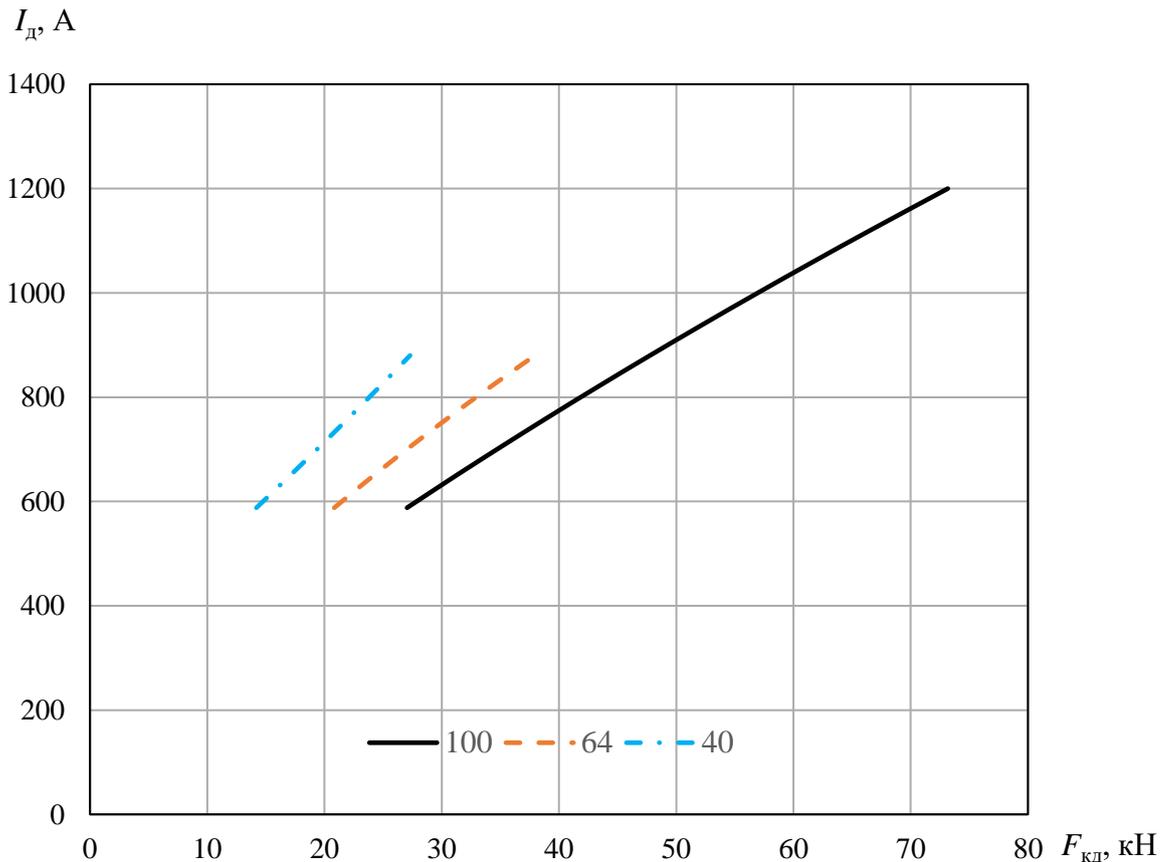


Рисунок 4.13 – Зависимость силы тока от силы тяги тягового двигателя ЭД133 на всех ступенях возбуждения

Полиномы аппроксимирующей функции для графиков полного (100 %) и ослабленного (64 % и 40 %) возбуждения тягового двигателя представлены выражениями 4.28 – 4.30:

100%:

$$y = -2 \cdot 10^{-9}x^4 + 7 \cdot 10^{-6}x^3 - 1,1 \cdot 10^{-3}x^2 + 1,8x + 93,2; \quad (4.28)$$

64 %:

$$y = -10^{-8}x^4 + 3 \cdot 10^{-5}x^3 - 2,5 \cdot 10^{-3}x^2 + 2,41x + 104,2; \quad (4.29)$$

40%:

$$y = -7 \cdot 10^{-8}x^4 + 10^{-5}x^3 - 6 \cdot 10^{-2}x^2 + 3,48x + 124,5. \quad (4.30)$$

Данная характеристика использовалась в дальнейшем при определении КПД тягового генератора и выпрямителя, через известное соотношение силы тяги двигателя и крутящего момента на валу [61]:

$$F_{\text{кд}} = \frac{M_{\text{д}}}{R_{\text{к}}}, \quad (4.31)$$

где $M_{\text{д}}$ – момент на валу ТЭД, Н·м;

$R_{\text{к}}$ – радиус колеса, м;

$F_{\text{кд}}$ – сила тяги колёсно-моторного блока, Н.

Ток тягового электродвигателя $I_{\text{д}}$ определён с использованием найденной ранее вспомогательной характеристики $I_{\text{д}}(F_{\text{кд}})$ из электротяговой характеристики $F_{\text{кд}}(I_{\text{д}})$ (рисунок 4.13). Тогда ток выпрямительной установки одной секции будет равен:

$$I_{\text{д}} = I_{\text{д}} \cdot 6, \quad (4.32)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток тягового двигателя, А;

$I_{\text{д}}$ – ток выпрямительной установки, А.

Мощность на входе выпрямительной установки:

$$P_{\text{ВУ}} = \frac{P_{\text{ТЭД}}}{\eta_{\text{ВУ}}}, \quad (4.33)$$

где $\eta_{\text{ВУ}}$ – КПД выпрямительной установки тепловоза, при расчетах принято 0,98.

Величина КПД тягового синхронного генератора определена по зависимости на рисунке 4.14 [97] в соответствии с известным током фазы I_ϕ тягового синхронного генератора.

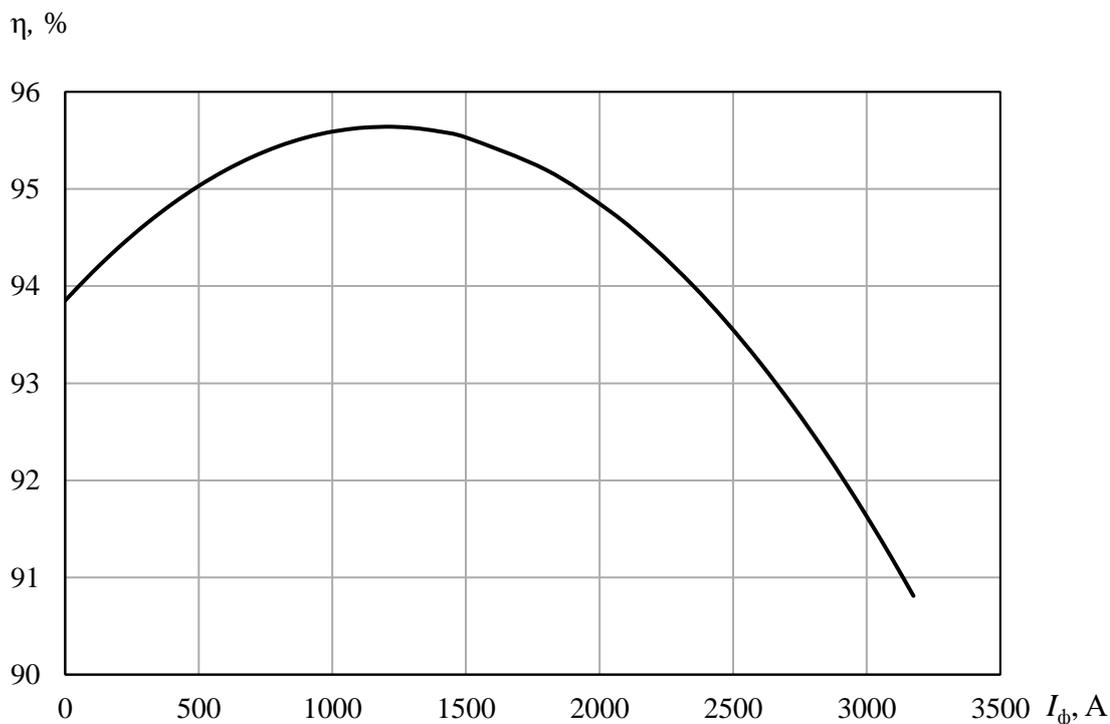


Рисунок 4.14 – Зависимость КПД тягового генератора ГС-501 от тока фазы

Механическая мощность на валу генератора, отдаваемая на тягу, равна:

$$P_{\text{СГ}} = \frac{P_{\text{ВУ}}}{\eta_{\text{СГ}}}, \quad (4.34)$$

где $\eta_{\text{СГ}}$ – КПД тягового синхронного генератора рисунок 4.14.

В свою очередь, ток фазы I_ϕ тягового генератора определён по формуле [7]:

$$I_\phi = \frac{I_d}{2} \cos \gamma, \quad (4.35)$$

где $\cos \gamma$ – коэффициент мощности синхронного генератора.

Мощность на валу синхронного генератора, отдаваемая на тягу, определяется как отношение касательной мощности к полному КПД электрической передачи тепловоза:

$$P_{CG} = \frac{P_k}{\eta_{TP} \cdot \eta_d \cdot \eta_{CG} \cdot \eta_{BY}}. \quad (4.36)$$

Эффективная мощность дизеля определена как сумма мощности синхронного генератора и мощности, затрачиваемой для работы вспомогательного оборудования:

$$N_e = P_{CG} + P_{CH}, \quad (4.37)$$

где N_e – эффективная мощность дизеля, Вт;

P_{CG} – мощность синхронного генератора, отдаваемая на тягу, Вт;

P_{CH} – мощность вспомогательного оборудования тепловоза, Вт.

Затраты мощности генератора на обеспечение собственных нужд тепловоза определяется как сумма мощностей электродвигателей привода вспомогательного оборудования:

$$P_{CH} = P_{MB} + P_{OxTD} + P_{OxBY} + P_{Комп}, \quad (4.38)$$

где P_{MB} – мощность мотор-вентиляторов охлаждения шахты холодильника. В расчётах равна 60 кВт;

P_{OxTD} – мощность мотор-вентиляторов охлаждения тяговых электродвигателей первой и второй тележки. В расчётах равна 90 кВт;

P_{OxBY} – мощность мотор-вентилятора охлаждения выпрямительной установки в расчётах равна 7 кВт;

$P_{Комп}$ – мощность электродвигателя компрессора в расчётах 18 кВт.

На основе данных [48] получено значение мощности генератора, которое отдаётся на обеспечение собственных нужд одной секции равной 175 кВт.

В свою очередь, удельный расход топлива тепловозом, затраченный на вождение поезда заданной массы на рассматриваемом участке в любой момент времени и при заданной силе тяги локомотива можно найти из эксплуатационных характеристик тепловозного дизеля типа Д49 (рисунок 4.15) [87], зная эффективную мощность дизеля N_e из формулы (4.37).



**Рисунок 4.15 – Параметры расхода топлива дизеля Д49 16ЧН 26/26
в зависимости от мощности**

Общий расход топлива тепловозом при выполнении работы на рассматриваемом участке будет равен сумме расходов по времени при движении с постоянной силой тягой плюс расход топлива на работу вспомогательного оборудования:

$$E = \sum g_e \cdot t_e + g_x \cdot t_x, \quad (4.39)$$

где g_e – расход топлива за 1 мин при движении тепловоза в режиме тяги, определённый из расчета, кг/мин;

t_e – время работы на заданной мощности дизеля, мин;

g_x – расход топлива на работу вспомогательного оборудования, кг/мин;

t_x – время работы вспомогательного оборудования тепловоза, мин.

На основании проведённых тяговых расчётов с использованием математической модели электрической передачи тепловоза был найден суммарный расход топлива тепловозом. В качестве примера на рисунке 4.16 представлен график расхода топлива при движении с поездом весом 1800 т и скорости ветра 6 м/с по заданному участку.

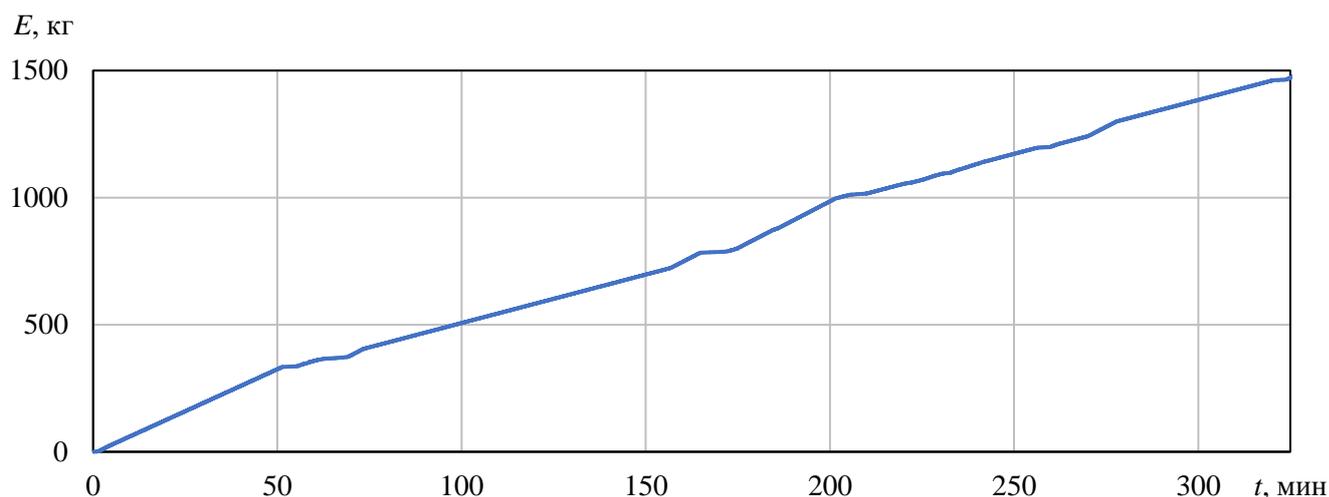


Рисунок 4.16 – Расход топлива тепловозом при движении по участку

Как видно из полученных результатов, движение поезда осуществляется с заданной технической скоростью, время хода составило 325 мин, что соответствует среднетехническому значению, определённом на основании данных, полученных из маршрутов машиниста.

4.4 Определение расхода топлива на тягу поезда с применением разработанной модели

Для проверки предложенной методики в работе моделировалось движение поезда, состоящего из 71 порожнего полувагона общей массой 1800 т, со скоростью, равной 40 км/ч и 60 км/ч, в соответствии с режимной картой. При этом были реализованы две остановки на станциях Кайсацкая и Ингеловский, на которых выполняется пересечение государственной границы между Российской Федерацией и Республикой Казахстан. При движении поезд был подвержен действию ветра, скорость ветра изменялась в диапазоне от нуля до тринадцати м/с, направление ветра составляло 75 градусов, что соответствует наиболее вероятному направлению согласно данным метеостанции Эльтон. Результаты расчёта по

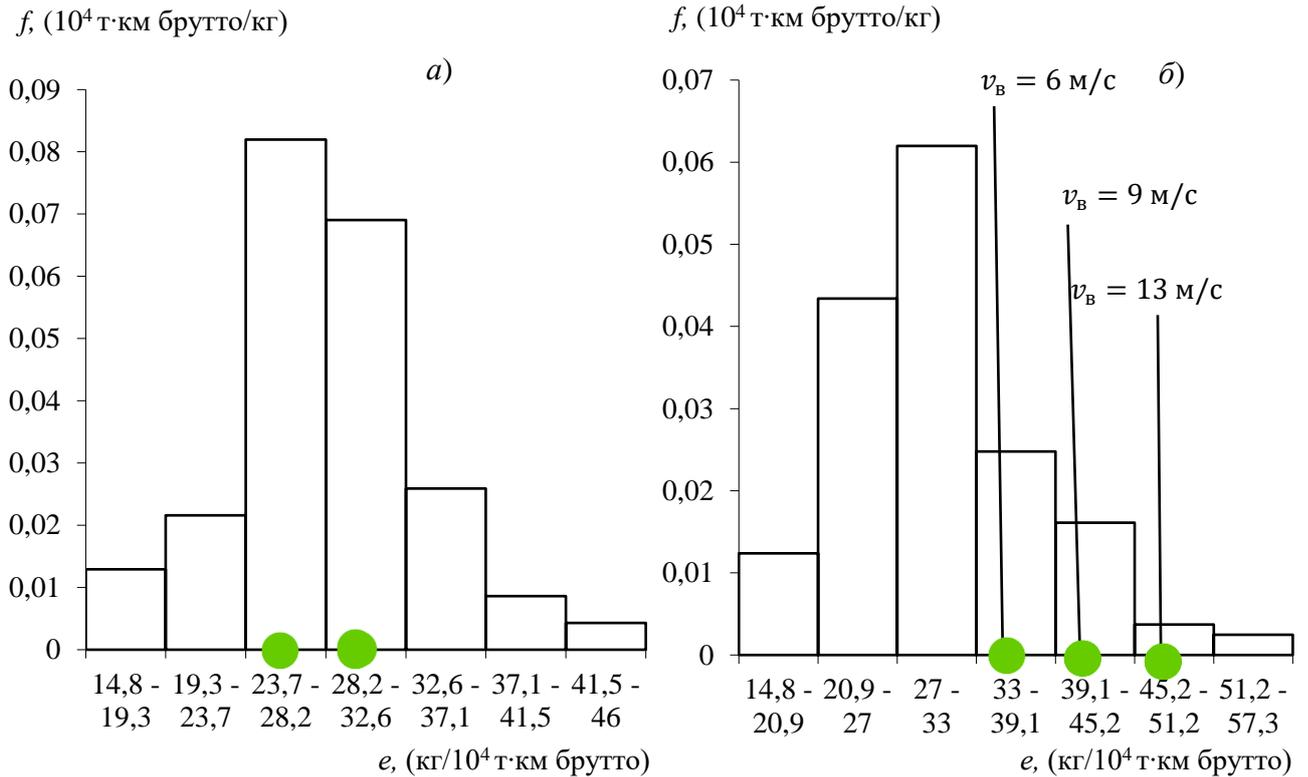
определению расхода топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расход топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч

Скорость ветра, м/с	Скорость движения поезда			
	$v = 40$ км/ч		$v = 60$ км/ч	
	Расход топлива			
	E , кг	e , кг/10 ⁴ т·км брутто	E , кг	e , кг/10 ⁴ т·км брутто
0	1178	27,4	1311	30,5
6	1490	34	1600	37,3
9	1812	42,2	1793	41,8
13	2066	48,1	2045	47,6

Полученные расчётные значения удельного расхода топлива, для оценки достоверности результатов, нанесены точками на гистограмму плотности распределения удельного расхода топлива тепловозами при вождении поездов массой 2000 т при отсутствии (рисунок 4.17, *а*) и наличии (рисунок 4.17, *б*) ветровой нагрузки, полученные при статистическом анализе маршрутов машинистов [28].

Как видно, полученные результаты расчётов в достаточной мере соответствуют результатам, полученным при выполнении статистического анализа, как для случая благоприятных погодных условий, характеризующихся отсутствием дополнительной ветровой нагрузки на поезд, так и для случаев неблагоприятных погодных условий, характеризующихся действием ветра. При отсутствии ветровых нагрузок полученные в результате расчёта величины удельного расхода топлива соответствует наиболее вероятным статистическим значениям расхода (рисунок 4.17, *а*). По мере возрастания скорости ветра, значения удельного расхода, полученные расчётным путём, возрастают, при этом бóльшим значениям скорости ветра соответствуют бóльшие значения расхода, являясь, однако, в достаточной мере соответствующими результатам анализа статистических данных.



а – при отсутствии ветровых нагрузок; б – при их наличии

Рисунок 4.17 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозами 2ТЭ25КМ при работе с поездами весом 2000 т

Таким образом, предложенная имитационная модель позволяет с достаточной точностью определять величину расхода топлива на тягу и может быть успешно применена для вопросов нормирования расхода топливных ресурсов на тягу поездов, обращающихся на участках со сложными метеорологическими условиями, а также с целью выявления влияния ветровых нагрузок на тягу поездов.

4.5 Выводы по четвёртому разделу

1 Опираясь на эмпирические формулы из Правил тяговых расчётов и результаты аэродинамического расчёта из раздела 3, предложен способ учёта величины аэродинамической составляющей сопротивления движению вагонов поезда при наличии ветровой нагрузки. Данный способ определения

сопротивления движению позволяет вычислить величину силы, действующую на каждый вагон, что допускает его применение совместно с многомассовой моделью поезда.

2 Разработана математическая модель электрической передачи мощности локомотива, позволяющая определять величину мгновенного и суммарного расхода топлива локомотивом за время работы. Модель учитывает потери энергии в элементах передачи мощности тепловоза, а также расход топлива на обеспечение собственных нужд (охлаждение оборудования, привод вспомогательных машин).

3 Выполнен тяговый расчёт для случаев движения поезда по выбранному ранее участку Приволжской железной дороги, реализующий предложенный способ определения сил аэродинамического сопротивления движению. На основании результатов выполненного тягового расчёта с использованием разработанной модели электрической передачи мощности тепловоза были определены величины расхода топлива на тягу поезда как при наличии ветра, так и при его отсутствии. Полученные в процессе выполнения расчёта значения в достаточной мере соответствуют результатам, найденным при статистической обработке результатов и полученных в процессе эксплуатации на выбранном участке железной дороги, что соответствует достаточно высокой достоверности расчётных данных и о возможности применения модели на других участках железных дорог.

5 УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ НОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

5.1 Методика нормирования при наличии ветровых нагрузок

Стандартный метод, который используется на практике в локомотивных депо, заключается в анализе маршрутов машинистов инженером по теплотехнике с последующей корректировкой нормы расхода в автоматизированной системе ЦОММ ОАО «РЖД» [65] с целью выявления дополнительных нормообразующих факторов. Для этого собирается необходимая выборка маршрутов машинистов (примерно 200 штук) с присутствием дополнительных факторов, к примеру, таких как климатические условия, изменения параметров движения и др. Дополнительные факторы выявляются на основе многочисленных рапортов машинистов за поездку, либо по резкому изменению значения фактического расхода топлива.

Так, с учётом результатов выполненного во втором разделе статистического анализа расхода ТЭР на участке Палласовка – Верхний Баскунчак, для порожних поездов весом 2000 т следует увеличить норму расхода топлива на 6,5 %, а для груженых (6000 т) на 3,4 %.

В автоматизированной системе ЦОММ, используемой в ОАО «РЖД» для нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу, данная корректировка выполняется следующим образом. Инженер-теплотехник локомотивного депо выбирает участок, для которого выполняется корректировка норм расхода, серию локомотива, обслуживающую данный участок, а также вид выполняемой работы, для которой осуществляется нормирование. Затем выполняется выборка поездов по осевой нагрузке, в которой можно изменить норму расхода топлива. Величина корректировки задаётся в виде количества процентов, определённых в процессе статистической обработки исходных данных.

Также норму расхода, устанавливаемую в виде величины удельного расхода топлива, можно указать непосредственно.

При использовании данного метода необходимо выполнить сложный и достаточно трудоёмкий ручной анализ выборки данных большого объёма для получения достоверного значения корректирующих параметров при возникновении переменных факторов, влияющих на расход. Таким образом, существенным недостатком метода является возможное влияние человеческого фактора на получаемый результат.

Для ликвидации указанных недостатков предлагается усовершенствованный автоматизированный метод, позволяющий на основе статистической обработки маршрутов машинистов учесть влияние дополнительных нормообразующих, а также реальных эксплуатационных факторов на расход топливно-энергетических ресурсов. Предлагаемый метод использует результаты статистической обработки информации о расходе ТЭР, содержащейся в маршрутах машинистов, и позволяет использовать автоматизированные программные комплексы, предназначенные для учёта расхода ТЭР, разработанные и используемые в ОАО «РЖД» [22].

Для реализации предложенного подхода вместо анализа полноразмерной выборки данных необходимо выполнить анализ только маршрутов машинистов из поездов, в которых отмечено влияние дополнительных факторов, например особенности климатических и погодных явлений, либо отмечено существенное, необоснованное изменение значения фактического расхода топлива. Далее по полученным данным выполняется построение графика зависимости удельного расхода топливно-энергетических ресурсов от величины дополнительного фактора (температура, скорость ветра), повлиявшего на него, и выполняется аппроксимация данных каким-либо аналитическим выражением [80]. С использованием полученных коэффициентов уравнения аппроксимации выполняется корректировка данных в ЦОММ на момент появления переменных факторов [77]. Для этого в соответствующее диалоговое окно программы ЦОММ необходимо добавить в строку с соответствующей фиксированной нагрузкой на ось полученное значение коэффициентов аппроксимации для рассматриваемого участка, серии

локомотива и вида выполняемой работы, т. е. увеличить величину удельного расхода ТЭР на это значение.

В качестве примера использования предлагаемого метода на рисунке 5.1 представлены данные, полученные из выборки значений удельного расхода топлива тепловозами 2ТЭ25КМ на участке Палласовка–Верхний Баскунчак, выделенной из общего объёма данных.

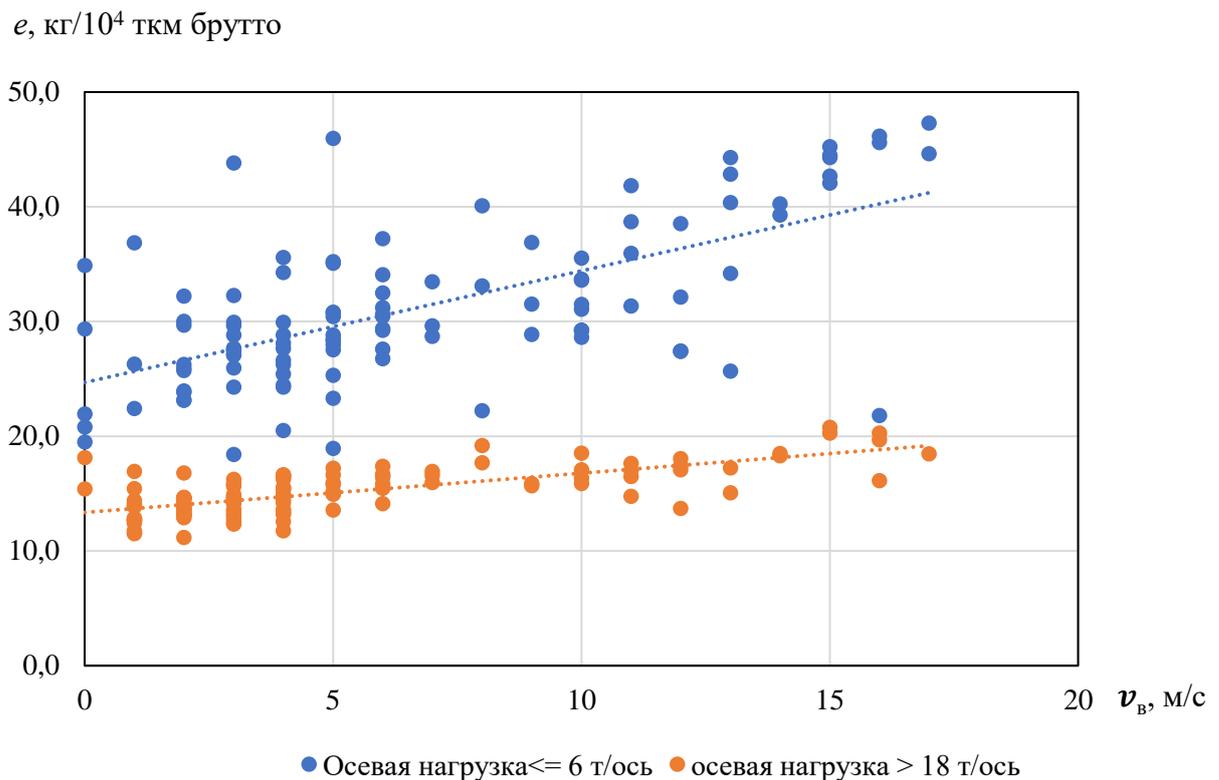


Рисунок 5.1 – Удельный расход топлива на участке для поездов с минимальной и максимальной осевой нагрузкой

Основанием для выделения из общего объёма являлись рапорты машинистов. Использованная для анализа информация соответствует периодам с сентября по ноябрь 2020 и с марта по май 2021 года. Данные были сгруппированы по критерию величины осевой нагрузки. В качестве основных нормообразующих факторов для данной выборки были приняты средняя осевая нагрузка и масса состава. Другим нормообразующим фактором в рассматриваемом случае является скорость ветра на

момент появления сложного климатического условия. Данные о скорости ветра, действующей во время поездки, взяты из архива наблюдений метеостанции [73].

Выборочные данные были аппроксимированы с использованием линейной зависимости, соответствующие уравнения для случая минимальной и максимальной осевой нагрузки приведены ниже (уравнения 5.1 и 5.2, соответственно).

$$y = 0,9728x + 24,686; \quad (5.1)$$

$$y = 0,3422x + 13,354. \quad (5.2)$$

Как видно из представленного результата и как было показано ранее, на расход топливно-энергетических ресурсов существенно влияет средняя осевая нагрузка поезда. Так, при нагрузке на ось $q \geq 18$ т/ось, увеличение удельного расхода топлива при возрастании скорости ветра на 1 м/с составило $0,34 \text{ кг}/10^4 \cdot \text{т} \cdot \text{км}$ брутто (выражение 5.2); для порожних поездов это значение значительно больше и составляет $0,97 \text{ кг}/10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ брутто (выражение 5.1). Полученные значения необходимо учесть в программе ЦОММ, увеличив удельную норму расхода ТЭР на момент возникновения неблагоприятных метеоусловий [26].

На основе статистического анализа маршрутов машинистов, проведённого во втором разделе, было получено, что для порожних поездов удельный расход топлива при наличии ветровых нагрузок увеличивается на 6,5 %, а для гружёных на 3,4 %, что в целом подтверждает аппроксимированные данные.

Существенным преимуществом предложенного метода является то, что определённые при его применении физически обоснованные технические нормы позволяют эффективно использовать их для обоснования плановых норм расхода топливно-энергетических ресурсов для локомотивного депо по видам тяги и видам движения. Полученные расчётные значения норм расхода возможно использовать для выявления маршрутов с некорректной информацией о расходе ТЭР; выявления машинистов, систематически перерасходуемых электроэнергию или дизельное топливо, для анализа технического состояния аппаратуры измерения расхода ТЭР, а также оперативного учёта дополнительных факторов, влияющих на расход.

Также новый метод позволяет комплексно автоматизировать расчёты и минимизировать участие инженера по теплотехнике в техническом нормировании расхода ТЭР на тягу поездов, снизив влияние человеческого фактора на получаемые результаты.

5.2 Методика нормирования на основе тягового расчета с использованием имитационной модели поезда

Как было показано ранее в разделе 4, величины расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в условиях воздействия дополнительных нормообразующих факторов, определённые в результате выполнения тягового расчёта с применением результатов имитационного эксперимента, выполненного в разделе 3, в достаточной степени соответствуют статистически обоснованным величинам. На основании этого предлагается уточнить предложенную методику, заменив вычисление поправочных коэффициентов методами статистической обработки на их определение по результатам математического моделирования с использованием предложенных моделей и подходов для снижения влияния человеческого фактора.

Поправочный коэффициент $k_{\text{в}}$ соответствует относительному увеличению расхода топлива при наличии ветра, воздействующего на поезд, следующим образом:

$$k_{\text{в}} = 1 + \left(\frac{e_1 - e_2}{e_1} \right), \quad (5.3)$$

где, e_1 – величина удельного расхода топлива при движении в условиях ветровой нагрузки;

e_2 – величина удельного расхода топлива при движении в безветренную погоду.

Так, для участка Палласовка – Верхний Баскунчак при наличии на участке ветра со скоростью, равной 6 м/с, поправочный коэффициент k_B будет равен:

$$k_B = 1 + \left(\frac{37,3 - 30,5}{37,3} \right) = 1,18. \quad (5.4)$$

Далее в таблице 5.1 приведены результаты вычисления поправочных коэффициентов для значений среднетехнической скорости, равных 40 км/ч и 60 км/ч.

Таблица 5.1 – Коэффициенты учёта ветровой нагрузки на расход ТЭР

Скорость ветра, м/с	Скорость движения поезда	
	$v = 40$ км/ч	$v = 60$ км/ч
	Коэффициент k_B	
0	0	0
6	1,25	1,18
9	1,35	1,27
13	1,41	1,36

Для корректировки нормы расхода ТЭР на исследуемом участке необходимо на основе анализа маршрута машиниста вычислить среднетехническую скорость движения и ознакомиться числом и типом вагонов в составе поезда. Также на основании данных метеостанции, в зоне которой проходил маршрут поезда, необходимо выбрать среднюю пиковую скорость ветра на момент поездки [71].

Из заранее рассчитанной таблицы выбирается соответствующий коэффициент поправки нормы расхода на ветер k_{Bi} , после чего вычисляется скорректированная норма расхода ТЭР при наличии ветровых нагрузок, с учётом формирования поезда:

$$b = k_{Bi} \cdot \beta \cdot b_{нач}, \quad (5.5)$$

где b – скорректированная с учётом ветровых нагрузок удельная норма расхода ТЭР, ед. изм/10⁴ т·км брутто;

k_{Bi} – коэффициент поправки на ветровые нагрузки;

$b_{\text{нач}}$ – базовая норма удельного расхода ТЭР, вычисленная на основе статистической обработки маршрутов машинистов ед. изм/ 10^4 т·км брутто;

β – коэффициент поправки, учитывающий тип вагонов в составе поезда (формула 3.11).

В качестве примера корректировки нормы расхода топлива за поездку рассмотрен маршрут № 268 от 9.03.2021, тепловоз 2ТЭ25КМ-211, вес поезда 2838 т, 292 оси, состав разнородный, расход по факту 1972 кг, норма расхода 1660 кг, среднетехническая скорость 60 км/ч, скорость ветра по данным метеостанции 9 м/с. Вычисленная в соответствии с рассмотренной методикой скорректированная норма расхода:

$$b = 1,27 \cdot 0,95 \cdot 1660 = 2003 \text{ кг.} \quad (5.6)$$

Таким образом, применение предложенной методики корректировки позволяет определить обоснованную норму расхода топливно-энергетических ресурсов, учитывающую дополнительные нормообразующие факторы.

Предложенные методы позволяют эффективно решать важные задачи технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, в частности устанавливать объективную норму расхода для участка обращения локомотивных бригад, не применяя больших усилий для её отыскания. Результаты расчётов и анализа показывают, что разработанные методики обеспечивают достаточно высокую точность при расчётах, что подтверждено комплексной обработкой статистических данных, математическим моделированием исследуемого явления на базе современных программных комплексов, реальными поездками, тяговым расчётом и может быть использована для технического нормирования ТЭР в локомотивных депо. Погрешность данного метода может быть вычислена по следующей формуле, сравнив фактические значения расхода топлива из эксплуатации и расчётные:

$$\frac{2003 \text{ кг} - 1972 \text{ кг}}{2003 \text{ кг}} \cdot 100 \% = 1,6 \%. \quad (5.7)$$

5.3 Выводы по пятому разделу

1 Разработан способ учёта влияния ветровых нагрузок при нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов на основании данных о величинах расхода топлива за промежуток времени, в течение которого наблюдалось неблагоприятное погодное явление, и числовых значениях параметров, характеризующих данное метеорологическое явление. На основании коэффициентов аппроксимирующей функции графика зависимости расхода топлива от неблагоприятного погодного условия можно осуществлять мероприятия по корректировке норм расхода топлива в локомотивных депо.

2 Разработаны предложения по усовершенствованию действующей методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов, принятой в ОАО «РЖД», заключающийся во включении в ряд нормообразующих коэффициентов, дополнительного повышающего норму расхода коэффициента, зависящего от влияния ветровых нагрузок и найденного по результатам выполнения тяговых расчётов с учётом ветровой нагрузки в 4 разделе. Данное мероприятие позволяет формировать обоснованную норму расхода топлива, не требуя при этом трудоёмкого и сложного статистического анализа исходных данных, предъявляющего высокие требования к квалификации работников линейных предприятий, выполняющих эти расчёты.

3 Выполненные с применением обеих методик расчёты показали, что вычисленные таким образом нормы расхода являются обоснованными, в большей мере соответствующими фактическому расходу топлива за данный промежуток времени, погрешность не превышает 1,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнен анализ методик нормирования ТЭР на тягу поездов, который показал, что в ранее разработанных методиках не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Целесообразно расширить перечень критериев, учитываемых при нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов в локомотивном хозяйстве.

2 Установлено с помощью статистического анализа маршрутов машинистов значительное влияние ветровых нагрузок на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Показано, что наличие ветра увеличивает выборочное среднее и медианное значения величины расхода, а также увеличивает асимметрию закона распределения за счёт увеличения правой части, соответствующей большим значениям расхода топлива, и влияние ветра более существенно для порожних поездов, чем для гружёных.

3 Предложена методика выполнения имитационного эксперимента по определению аэродинамического сопротивления подвижного состава при действии ветровой нагрузки позволила найти зависимости изменения величины сопротивления от скорости подвижного состава, скорости ветра и угла между направлением ветрового потока и направлением вектора скорости поезда. Установлен характер изменения величины аэродинамического сопротивления, действующего на различные экипажи поезда в зависимости от их положения в составе. Найденные числовые значения и характеристики позволяют распространить полученные результаты расчёта аэродинамического сопротивления на поезда произвольной длины.

4 Предложен способ учёта влияния на расход топлива аэродинамической составляющей сопротивления движению вагонов поезда при действии ветровых нагрузок. Применять данный способ целесообразно совместно с многомассовой моделью поезда. Это позволяет учесть индивидуальные особенности каждого

экипажа в составе, в том числе тип вагона, его расположение на пути и массу. Величина аэродинамического сопротивления каждого экипажа при этом выбирается из совокупности данных, полученных в результате выполнения аэродинамического расчёта.

5 Разработана модель передачи мощности тепловоза, позволяющая использовать её при выполнении тяговых расчётов по определению мгновенного и суммарного расхода топлива на тягу поезда. Разработанная модель учитывает изменение коэффициента полезного действия компонентов, образующих передачу мощности, в зависимости от эксплуатационных нагрузок, а также учитывает влияние на расход топлива потребителей собственных нужд локомотива. Полученная с использованием предложенной модели величина расхода топлива соответствует результатам, полученным при статистической обработке экспериментальных данных во втором разделе как при отсутствии, так и при наличии ветровой нагрузки. При отсутствии ветровой нагрузки получена величина удельного расхода топлива равная $28,3 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто на основании статистической обработки и $27,4 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто на основании тягового расчёта, а при наличии $32,2 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто и $34 \text{ кг}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто соответственно.

6 Разработаны предложения по совершенствованию методики выполнения расчётов по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов, снижающие зависимость получаемых результатов от квалификации работников депо, выполняющих такой расчёт, а также позволяющие повысить обоснованность устанавливаемых норм расхода. Предлагаемая методика позволяет учесть климатические особенности и фактические погодные явления на участках обслуживания локомотивного депо. Результаты расчётов, полученные с применением уточнённой методики, подтверждены результатами статистического анализа результатов эксплуатационной работы, выполненной локомотивным депо Ершов Приволжской железной дороги, проведенным во втором разделе.

7 Рекомендуется применение представленной методики на основе полученных результатов, разработанных в диссертационной работе, для совершенствования системы нормирования расхода топливно-энергетических

ресурсов в локомотивных депо, обслуживающие участки железных дорог, подверженные влиянию метеорологических факторов, оказывающих влияние на расход топлива.

8 Перспективой дальнейшей разработки темы является уточнение методики определения влияния ветровых нагрузок на поезда, состоящие из других типов вагонов, а также смешанных поездов. Также целесообразно уточнение полученных результатов для случаев нахождения поезда в кривых участках пути.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ НБД – автоматизированная система учета нарушений безопасности движения

АСУВ0П2 – автоматизированная система учета выдачи предупреждений

ВНИИЖТ – Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

ДГУ – дизель-генераторная установка

КГУТ – килограмм условного топлива

КПД – коэффициент полезного действия

МПС – Министерство путей сообщения

ОмГУПС – Омский государственный университет путей сообщения

ПГУПС – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПТР – правила тяговых расчетов

САУ – система автоматического управления

ТПС – тяговый подвижной состав

ТР – тяговый редуктор

ТЧЭ – эксплуатационная тяговая часть (локомотивное депо)

ТЭД – тяговые электродвигатели

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

ЦОММ – централизованная система обработки маршрутов машинистов

ЭРЧО – электронный регулятор числа оборотов (дизеля)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Абрамович, Г. Н.** К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле / Г. Н. Абрамович. – Москва : ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского, 1937. – Вып. 400. – 32 с. – Текст : непосредственный.

2 **Алямовский, А. А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 464 с. – ISBN 978-5-94074-586-0. – Текст : непосредственный.

3 **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation: как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 441 с. – ISBN 978-5-9775-0763-9. – Текст : непосредственный.

4 **Астахов, П. Н.** Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава / П. Н. Астахов. – Москва : Транспорт, 1966. – 178 с. – Текст : непосредственный.

5 **Боландова, Ю. К.** Методы оценки устойчивости от опрокидывания контейнеров при перевозке на специализированных железнодорожных платформах : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Боландова Юлия Константиновна ; Российский университет транспорта. – Москва, 2021. – 153 с. – Текст : непосредственный.

6 **Боландова, Ю. К.** Оценка аварийного риска при движении поездов в результате воздействия чрезвычайных ситуаций природного характера, возникающих в окружающей среде / Ю. К. Боландова, В. Г. Попов, Ф. И. Сухов. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2018. – № 4. – С. 115–120.

7 **Брускин, Д. Э.** Электрические машины : учебник : в 2 ч. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Москва : Высшая школа, 1979. – 304 с. – Текст : непосредственный.

8 **Бубнов, В. А.** Гидродинамика: механика частицы жидкости / В. А. Бубнов. – Москва : URSS, 2018. – 302 с. – ISBN 978-5-9710-4497-0. – Текст : непосредственный.

9 **Верещак, Д. М.** Электродвигатель тяговый постоянного тока ЭД 133 УХЛ1 : протокол периодических испытаний. ТХ.218.1277 / Д. М. Верещак. – Харьков, 2015. – 19 с. – Текст : непосредственный.

10 **Воробьёв, А. А.** Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройства для пантографа / А. А. Воробьёв, Я. С. Валутин, Д. Д. угли Каримов. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 453–459. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-453-459.

11 Вычислительная гидродинамика. – Текст : электронный // Инженерная компания Технополис : [сайт]. – URL: https://www.tpolis.com/ansys/files/ansys_gidrodynamic.pdf (дата обращения: 26.03.2024).

12 **Гарбарук, А. В.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2012. – 88 с. – ISBN 978-5-7422-3349-7. – Текст : непосредственный.

13 **Гиргидов, А. Д.** Механика жидкости газа (гидравлика) : учебник / А. Д. Гиргидов. – Москва : ИНФРА-М, 2014. – 703 с. – ISBN 978-5-16-009473-1. – Текст : непосредственный.

14 **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. – Москва : Юрайт, 2021. – 479 с. – ISBN 978-5-534-00211-9. – Текст : непосредственный.

15 **Горожанкин, С. А.** Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad / С. А. Горожанкин, А. А. Шитов, Н. В. Савенков. – Текст : непосредственный // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2016. – № 3 (247). – С. 35–47.

16 **ГОСТ 9238-2022.** Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений = Construction and Rolling stock clearance diagrams : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 31 октября 2022 г. № 155-П) : введен впервые : дата введения 2024-05-01 / разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 205 с. – Текст : непосредственный.

17 **ГОСТ 16350-80.** Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей = Climate of the USSR. Regionalizing and statistical parameters of climatic factors for technical purposes : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 декабря 1980 г. № 5857 : введен впервые : дата введения 1981-07-01 / разработан Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 150 с. – Текст : непосредственный.

18 **ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017.** Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов = Statistical interpretation of data. Part 4. Detection and treatment of outliers : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 августа 2017 г. № 865-ст : введен впервые : дата введения 2018-12-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД»). – Москва : Стандартинформ, 2017. – 48 с. – Текст : непосредственный.

19 **Гребенюк, П. Т.** Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.

20 **Гребенюк, П. Т.** Сопротивление троганию и движению поезда на пути сложного плана и профиля / П. Т. Гребенюк. – Текст : непосредственный //

Эксплуатация автотормозов на подвижном составе железных дорог : сборник научных трудов / под общ. ред.: В. Ф. Ясенцева, А. В. Казаринова. – Москва : Транспорт, 1989. – С. 19–27.

21 **Гребенюк, П. Т.** Тяговые расчеты : справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова; под ред. П. Т. Гребенюка. – Москва : Транспорт, 1987. – 271 с. – Текст : непосредственный.

22 **Гребнев, И. А.** Автоматизированный метод учета влияния ветровых нагрузок на тягу поездов / И. А. Гребнев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-2 (82). – С. 106–112.

23 **Гребнев, И. А.** Имитационная модель поезда для учета ветровых нагрузок / И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 1. – С. 30–40. – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-30-40.

24 **Гребнев, И. А.** К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд / И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4. – С. 13–22.

25 **Гребнев, И. А.** Оценка влияния воздушной среды на подвижной состав с использованием программного пакета SOLIDWORKS / И. А. Гребнев. – Текст : непосредственный // Неделя науки – 2022 : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Москва, апрель – май 2022 г.). – Москва : РУТ (МИИТ), 2022 – С. 252–253.

26 **Гребнев, И. А.** С учетом ветровых нагрузок / И. А. Гребнев. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 12. – С. 38–39.

27 **Гребнев, И. А.** Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка–Верхний Баскунчак / И. А. Гребнев. – Текст : непосредственный // Неделя науки – 2021 : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Москва, апрель – май 2021 г.). – Москва : РУТ (МИИТ), 2021 – С. 240–241.

28 **Гребнев, И. А.** Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка – Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок / И. А.

Гребнев, Н. Н. Сидорова, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3. – С. 550–557.

29 **Девнин, С. И.** Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций справочник / С. И. Девнин. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 331 с. – Текст : непосредственный.

30 **Дубинский, С. И.** Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дубинский Сергей Иванович ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2010. – 198 с. – Текст : непосредственный.

31 **Евсеев, В. Ю.** Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 32–38.

32 **Жигулин, Н. А.** Выбор модели поезда для решения задач статистической оценки топливно-энергетических ресурсов и управления движения поездов / Н. А. Жигулин, И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Интернаука. – 2021. – № 3 (179). – С. 68–70.

33 **Жуковский, Н. Е.** Теоретические основы воздухоплавания / Н. Е. Жуковский ; Студенческое Издательское Общество при ИМТУ. – Москва : Типо-Литография И. Х. Кавыкина, 1911. – 448 с. – Текст : непосредственный.

34 **Загузов, И. С.** Математические модели в аэрогидромеханике : учебное пособие / И. С. Загузов, К. А. Поляков. – Самара : Самарский университет, 2002. – 96 с. – ISBN 5-86465-86-9. – Текст : непосредственный.

35 **Зябриков, В. А.** Климат и железнодорожный транспорт / В. А. Зябриков, Н. В. Кобышева, В. С. Циркунов. – Москва : Изд-во ВНИИГМИ – МЦД, 2000. – 188 с. – Текст : непосредственный.

36 **Карасев, В. А.** Теория вероятностей и математическая статистика. Теория вероятностей : практикум / В. А. Карасев, Г. Д. Лёвшина. – Москва : МИСиС, 2015. – 124 с. – ISBN 978-5-87623-901-3. – Текст : непосредственный.

37 **Каримов, Д. Д. угли.** Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каримов Дастонбек Давронбой угли ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2023. – 127 с. – Текст : непосредственный.

38 **Кравец, В. В.** Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец. – Текст : непосредственный // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – № 8. – С. 61–69.

39 **Краснов, Н. Ф.** Аэродинамика : учебник : в 2 ч. Ч. 1: Основные теории. Аэродинамика профиля и крыла / Н. Ф. Краснов. – 6-е изд. – Москва : URSS, 2018. – 496 с. – Текст : непосредственный.

40 **Крон, И. Р.** Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению грузовых вагонов с применением цифровых моделей : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крон Игорь Романович ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2023. – 136 с. – Текст : непосредственный.

41 **Кузнецов, А. Г.** Стенд полунатурного моделирования динамических режимов энергетических установок с дизелями / А. Г. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 25–29.

42 **Лакин, И. И.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 161–166.

43 **Лемешко, Б. Ю.** Робастные методы оценивания и отбраковка аномальных измерений / Б. Ю. Лемешко. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. – 1998. – Т. 63. – № 5. – С. 43–49.

44 **Лопушинский, В. И.** Сопротивление паровозов и вагонов в движении и действие паровой машины паровоза на основании динамометрических и индикаторных опытов, произведенных в 1877-1878 гг. на Моршанско-Сызранской железной дороге / В. И. Лопушинский. – Санкт-Петербург : типография Министерства путей сообщения, 1883. – 152 с. – Текст : непосредственный.

45 **Лукин, В. В.** Вагоны. Общий курс : учебник / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, Ю. П. Федосеев. – Москва : Маршрут, 2004. – 424 с. – Текст : непосредственный.

46 **Луков, Н. М.** Передачи мощности тепловозов / Н. М. Луков, В. В. Стрекопытов, К. И. Рудая. – Москва : Транспорт, 1987. – 279 с. – Текст : непосредственный.

47 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации : в 4 ч. Ч. 1. Техническое описание 2ТЭ25КМ РЭ. – Текст : электронный // Брянский машиностроительный завод. – 2015. – 153 с. – URL: https://www.avtoobzormira.ru/wp-content/uploads/2017/10/RE_2TE25KM_Chast_1.pdf.

48 Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ : структура системы управления и электрооборудования / И. А. Шаркин, П. Л. Чудаков, В. А. Линьков [и др.]. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 1 (709). – С. 42–43.

49 **Мартынов, А. К.** Экспериментальная аэродинамика : учебник / А. К. Мартынов. – Москва : Оборонгиза, 1958. – 346 с. – Текст : непосредственный.

50 Математическое моделирование аэродинамического поведения антенномачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном

транспорте / А. А. Локтев, В. В. Королев, О. И. Поддаева [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 2 (77). – С. 77–83. – DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-2-77-83.

51 Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 № 512. – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 37 с. – Текст : непосредственный.

52 Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов : утверждена Министерством путей сообщения РФ № ЦТД-26 от 26.06.1997 г. : на основании Указания МПС РФ от 20.06.1997 г. № В-741у «О методике анализа расхода энергоресурсов на тягу поездов». – Текст : электронный // Информационно-правовой портал Гарант : [сайт]. – URL: <https://base.garant.ru/70503780/>.

53 Механическая часть тягового подвижного состава : учебник / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под ред. И. В. Бирюкова. – Репр. изд. – Москва : Альянс, 2013. – 439 с. – ISBN 978-5-91872-025-7. – Текст : непосредственный.

54 **Михальчук, Н. Л.** Перспективные направления повышения эффективности дирекции тяги и требования к новым локомотивам / Н. Л. Михальчук. – Текст : электронный // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : материалы VI Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2018 г.). – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2018. – Т. 1. – С. 270–281.

55 **Молярчук, В. С.** Нормирование расхода электрической энергии на тягу поездов / В. С. Молярчук. – Москва : Трансжелдориздат, 1962. – 60 с. – Текст : непосредственный.

56 **Монин, А. С.** Статистическая гидромеханика / А. С. Монин, А. М. Яглом. – Москва : Наука, 1965. – 640 с. – Текст : непосредственный.

57 **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальные методы управления движением поездов : сборник научных трудов ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А.

Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Москва : Интекст, 2012. – 79 с. – ISBN 978-5-89277-106-1. – Текст : непосредственный.

58 **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 2. – С. 24–29.

59 Об утверждении временной методики оценки теплотехнического (технического) состояния локомотивов, влияющего на их энергоэффективность : Распоряжение ОАО «РЖД» от 31.03.2014 г. № 787р. – Текст : электронный // Железнодорожные документы : [сайт]. – URL: <https://jd-doc.ru/2014/mart-2014/14256-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-31-03-2014-n-787r>.

60 Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года : Распоряжение ОАО «РЖД» от 11.02.2008 г. № 269р. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : [сайт]. – 2011. – 30 марта. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (дата обращения: 17.02.2024).

61 **Осипов, С. И.** Теория электрической тяги : учебник / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – Москва : Маршрут, 2006. – 433 с. – ISBN 5-89035-333-0. – Текст : непосредственный.

62 Отчетность компании. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : [сайт]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (дата обращения: 18.04.2024).

63 **Петров, К. П.** Аэродинамика тел простейших форм / К. П. Петров. – Москва : Факториал, 1998. – 432 с. – ISBN 5-88688-014-3. – Текст : непосредственный.

64 Погода России : сервер метеорологической информации : [сайт]. – URL: meteo.infospace.ru (дата обращения: 28.04.2024).

65 Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» : Утверждено Распоряжением ОАО «РЖД» от 17.05.2019 № 962/р. – Москва : УралЮрИздат, 2023. – 32 с. – Текст : непосредственный.

66 **Поляков, Б. О.** Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными вагонами увеличенной грузоподъемности :

специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Поляков Борис Олегович ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2022. – 116 с. – Текст : непосредственный.

67 **Поляков, Б. О.** Разработка методики исследования аэродинамических особенностей подвагонного пространства в составе высокоскоростного электропоезда / Б. О. Поляков, Е. Я. Ватулина, Ю. П. Бороненко. – Текст : непосредственный // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 20–27 апреля 2020 г.). – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2020. – С. 47–50.

68 **Полякова, Е. Я.** Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Полякова Екатерина Яновна ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2021. – 150 с. – Текст : непосредственный.

69 **Постол, Б. Г.** Планирование расхода топлива на тягу поездов для сети железных дорог при помощи ЭВМ : специальность 05.05.01 «Метеорология специального назначения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Постол Борис Григорьевич. – Москва, 1977. – 22 с. – Текст : непосредственный.

70 Применение эталонной модели поезда в системе автоматического управления скоростью грузового поезда / О. Е. Пудовиков, С. В. Беспалько, М. Д. Киселев, Е. В. Сердобинцев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 9. – С. 9–13.

71 **Прох, Л. З.** Словарь ветров / Л. З. Прох. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 311 с. – Текст : непосредственный.

72 **Пудовиков, О. Е.** Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов / О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4. С. 81–88.

73 Расписание погоды : данные метеостанции Эльтон : [сайт]. – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 22.03.2024).

74 **Розенфельд, В. Е.** Теория электрической тяги : учебник / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с. – Текст : непосредственный.

75 Розы ветров. – Текст : элеткронный // Lakka-sails.ru : [сайт]. – URL: <http://lakka-sails.ru/winds/> (дата обращения: 15.04.2024).

76 **Сидорова, Е. А.** Снижение затрат в локомотивном хозяйстве железных дорог путем совершенствования системы учета и анализа эксплуатационных показателей : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Сидорова Елена Анатольевна ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2003. – 46 с. – Текст : непосредственный.

77 **Сидорова, Н. Н.** Расчет эффективности мероприятий по управлению перевозками на основе диаграммы энергобаланса / Н. Н. Сидорова, А. А. Бакланов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте : Тезисы докладов научно-практической конференции. – Москва : МИИТ, 1998. – С. 11–13.

78 Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, В. И. Астрахан, Я. М. Головичер [и др.]. – Москва : Транспорт, 1984. – 311 с. – Текст : непосредственный.

79 **Соболев, А. А.** Движение частиц в воздушном потоке / А. А. Соболев, Н. А. Мельников, Л. О. Тютюнник. – Текст : непосредственный // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 82–86.

80 Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов : сборник трудов

ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов [и др.] ; ред.: О. О. Смирнова, М. А. Малахова. – Москва : ВМГ-Принт, 2014. – 141 с. – ISBN 978-5-905277-42-9. – Текст : непосредственный.

81 **СП 20.13330.2016.** Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020). – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-15/079727a84b6dfc87f4f6c2db1a5693ed.pdf>.

82 Справка по SolidWorks. – Текст : электронный // Dassault Systèmes : [сайт]. – URL: https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r_help.htm.

83 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. № 769р. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : [сайт] – URL: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download>.

84 **Стромский, П. П.** Влияние ветра на сопротивление поезда / П. П. Стромский. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1959. – № 7. – С. 24–28.

85 **Стромский, П. П.** Определение коэффициента воздушного сопротивления вагонов / П. П. Стромский. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1963. – № 2. – С. 21–24.

86 **Сюзюмова, Е. М.** Оценка количественных и качественных характеристик воздушного сопротивления скоростного поезда / Е. М. Сюзюмова, Г. А. Романенко. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1978. – № 4. – С. 31–34.

87 Тепловозные дизели типа Д49 / Е. А. Никитин, В. М. Ширяев, В. Г. Быков [и др.] ; под ред. Е. А. Никитина. – Москва : Транспорт, 1982. – 255 с. – Текст : непосредственный.

88 Усовершенствованный тяговый привод тепловозов с коллекторными двигателями / Ю. И. Клименко, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев, Я. В. Чупин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2019. – № 3 (747). – С. 18–20.

89 Патент № 2202481 Российская Федерация МПК В60L 15/20. 2003. Устройство для автоматического регулирования скорости тягового подвижного состава : № 2000106413/28 : заявл. 17.03.2000 : опубл. 20.04.2003 / А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков. – 12 с. – Текст : непосредственный.

90 Феоктистов, В. П. Проблема нормирования и экономии энергозатрат в тяге поездов / В. П. Феоктистов, Н. Н. Сидорова, В. Ю. Погосов. – Текст : непосредственный // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2009. – № 1. – С. 58–97.

91 Феоктистов, В. П. Разработка методики нормирования расхода электроэнергии с учетом реальных факторов эксплуатации / В. П. Феоктистов, Н. Н. Сидорова. – Текст : непосредственный // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2008. – № 1. – С. 49–67.

92 ЦТ/2564 Инструкция по техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов. – Москва : ЦЕНТРМАГ, 2024. – 56 с. – ISBN 978-5-905080-14-2. – Текст : непосредственный.

93 Чурков, Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд / Н. А. Чурков. – Москва : Желдориздат, 2006. – 331 с. – ISBN 978-5-94069-013-9. – Текст : непосредственный.

94 Чурков, Н. А. Влияние боковой ветровой нагрузки на высокоскоростной подвижной состав / Н. А. Чурков, В. Г. Болдырев, И. Э. Чистосердова. – Текст : непосредственный // Динамика вагонов : сборник научных трудов / под ред. М. М. Соколова. – Ленинград : [б. и.], 1982. – С. 3–14.

95 Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта ; под ред. В. С. Авдеевского, В. Я. Лихущина. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1956. – 528 с. – Текст : непосредственный.

96 **Эйлер, Л.** Общие законы движения жидкостей / Л. Эйлер. – Текст : непосредственный // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1999. – № 6. – С. 26-54.

97 Электрооборудование тепловозов : справочник / В. С. Марченко, А. А. Сергеев, В. Т. Иванченко, В. Е. Верхогляд. – Москва : Академкнига, 2003. – 248 с. – ISBN 5-94628-115-1. – Текст : непосредственный.

98 Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе / И. К. Колесник, Т. Ф. Кузнецов, В. И. Липовка [и др.]. – Москва : Академкнига, 2005. – 156 с. – ISBN 5-94628-209-3. – Текст : непосредственный.

99 Aerodynamic behaviour investigation of the new EMUV250 train to cross wind / F. Cheli, F. Ripamonti, D. Rocchi, G. Tomasini. – Текст : непосредственный // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – № 4. – P. 189–201. – DOI: 10.1016/j.jweia.2009.10.015.

100 **Andrews, H. L.** The measurement of train resistance / H. L. Andrews. – Текст : непосредственный // Journal of Institution of locomotive engineers. – 1954. – Vol. 44. – № 237. – P. 91–166.

101 **Baker, C. J.** A review of train aerodynamics Part 2 – Applications / C. J. Baker. – Текст : непосредственный // The Aeronautical Journal. – 2016. – Vol. 118. – № 1201. – P. 345–382. – DOI: <https://doi.org/10.1017/S0001924000009179>.

102 **Cooper, R.** Atmospheric turbulence with respect to moving ground vehicles / R. Cooper. – Текст : непосредственный // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1984. – Vol. 17. – № 2. – P. 215–238. – DOI: 10.1016/0167-6105(84)90057-6.

103 **Cooper, R.** Probability of trains overturning in high winds / R. Cooper. – Текст : непосредственный // International Conference on Wind Engineering. Fort Collins, 1979. – P. 1185–1194.

104 **Copley, J.** The three-dimensional flow around railway trains / J. Copley. – Текст : непосредственный // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1987. – Vol. 26. – № 1. – P. 21–52. – DOI: 10.1016/0167-6105(87)90034-1.

105 Crosswind stability evaluation of high-speed train using different wind models / M. Yu, R. Jiang, Q. Zhang, J. Zhang. – Текст : непосредственный // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 32. – № 1. – Art. 40. – DOI: 10.1186/s10033-019-0353-7.

106 **CSN EN 14067-1** Railway applications – Aerodynamics – Part 1: Symbols and units. – Brussels : European committee for standardization, 2003. – 14 p. – Текст : непосредственный.

107 Evaluation of the Cross Wind Velocity Through Pressure Measurements on Train Surface / F. Cheli, L. Mariano, D. Rocchi [et al.]. – Текст : непосредственный // The Aerodynamics of Heavy Vehicles III. – 2016. – P. 143–158. – DOI: 10.1007/978-3-319-20122-1_9.

108 **Grebnev, I.** Identification of Wind Loads Through Train Statistical Analysis / I. Grebnev, N. Sidorova, O. Pudovikov. – Текст : непосредственный // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. – 2022. – Vol. 2. – P. 299–307.

109 High-Speed Train Crosswind Analysis: CFD Study and Validation with Wind-Tunnel Tests / C. Catanzaro, F. Cheli, D. Rocchi [et al.]. – Текст : непосредственный // The Aerodynamics of Heavy Vehicles III. – 2016. – P. 99–112. – DOI: 10.1007/978-3-319-20122-1_6.

110 Optimization on the crosswind stability of trains using neural network surrogate model / L. Zhang, T. Li, J. Zhang, R. Piao. – Текст : непосредственный // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 34. – Art. 86. – DOI: 10.1186/s10033-021-00604-0.

111 Railway aerodynamics of passing interaction with dynamic effects. – Текст : электронный // CORDIS – EU research results. – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/BRPR970603> (дата обращения: 23.04.2024).

112 **Remi, G.** Determination of aerodynamic coefficients of the TGV Duplex in wind tunnel for flat ground configurations / G. Remi, N. Paradot, J.-P. Bouchet. – Текст : электронный // Conference: EuroMech colloquium 509, Vehicle Aerodynamics. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/278410501>

113 **Rezvani, M. A.** Numerical calculations of aerodynamic performance for ATM train at crosswind conditions / M. A. Rezvani, M. Mohebbi. – Текст : непосредственный // *Wind and Structures*. – 2014. – Vol. 18. – № 5. – P. 529–548. – DOI: 10.12989/was.2014.18.5.529.

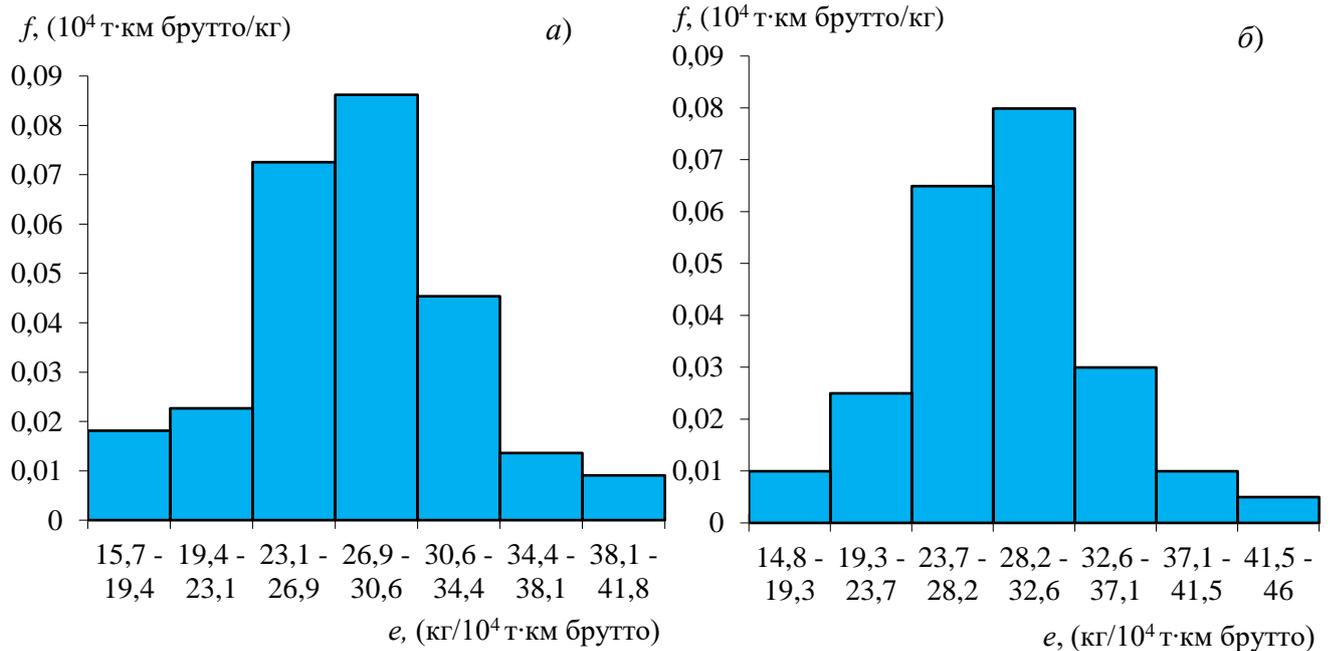
114 **Schetz, J. A.** Aerodynamics of high-speed trains / J. A. Schetz. – Текст : непосредственный // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2001. – Vol. 33. – № 1. – P. 371–414. – DOI: 10.1146/annurev.fluid.33.1.371.

115 **SolidWorks** : компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, Е. В. Собачкин, А. И. Одинцов [и др.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 799 с. – ISBN 5-94157-558-0. – Текст : непосредственный.

116 **Soper, D.** The aerodynamics of a container freight train / D. Soper. – Cham : Springer, 2016. – 330 p. – ISBN 978-3319332772. – Текст : непосредственный.

117 **Trivella, A.** The impact of wind on energy-efficient train control / A. Trivella, P. Wang, F. Corman. – Текст : непосредственный // *EURO Journal on Transportation and Logistics*. – 2020. – Vol. 10. – № 4. – Art. 100013. – DOI: 10.1016/j.ejtl.2020.100013.

**ГИСТОГРАММЫ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО
РАСХОДА ТОПЛИВА ТЕПЛОВОЗАМИ НА УЧАСТКЕ
ПАЛЛАСОВКА - ВЕРХНИЙ БАСКУНЧАК**



а – туда; *б* – обратно

Рисунок А.1 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ без ветра на участке Палласовка – Верхний Баскунчак для фиксированной минимальной нагрузки на ось

Таблица А.1 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т без ветра на участке Верхний Баскунчак – Палласовка и обратно в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездотока	Параметры статистических распределений				
	<i>N</i>	\bar{x}	σ	<i>min</i>	<i>x_{max}</i>
Удельный расход топлива при движении на участке Верхний Баскунчак – Палласовка <i>e</i> , кг/изм	59	27,8	5,11	15,7	41,8
Удельный расход топлива при движении на участке Палласовка – Верхний Баскунчак <i>e</i> , кг/изм	45	28,9	5,8	14,8	46

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

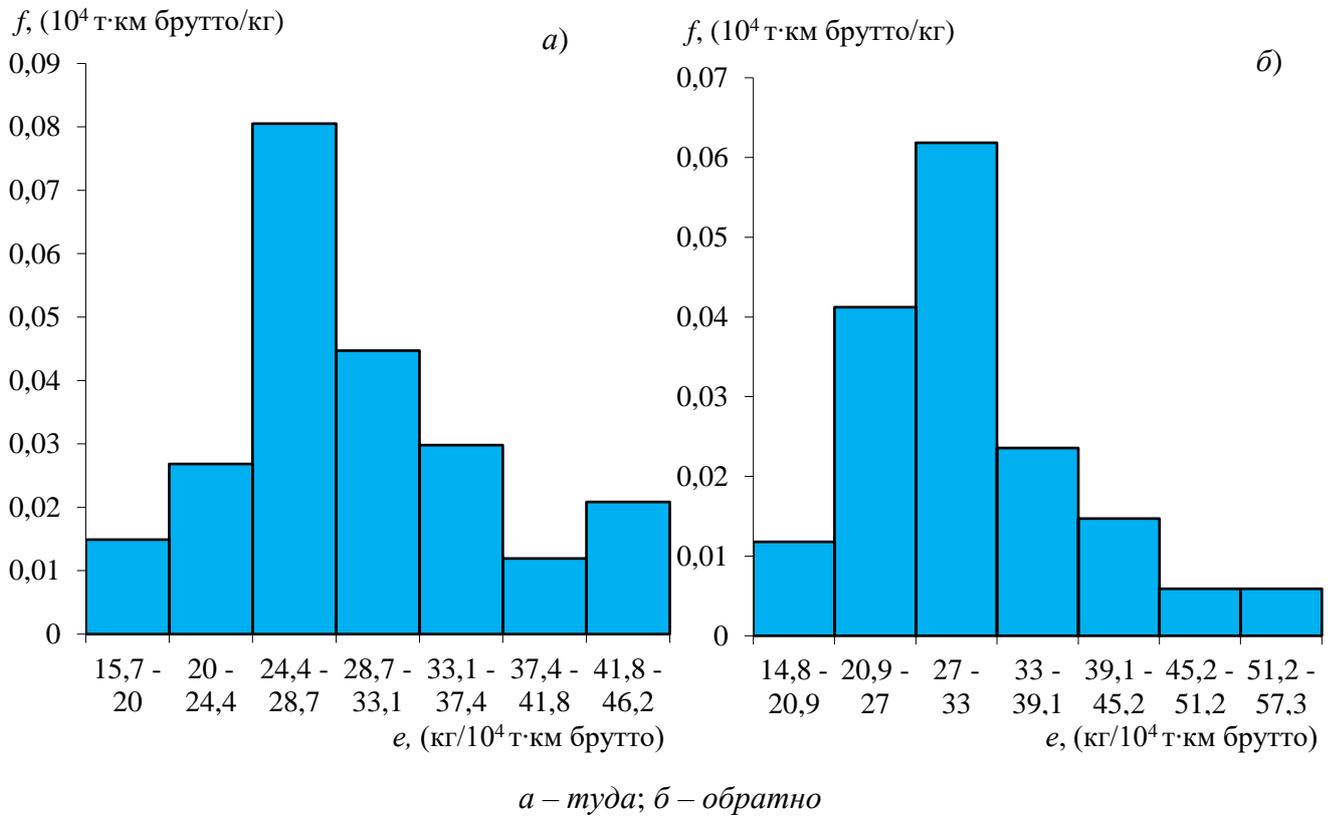


Рисунок А.2 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ с ветром на участке Палласовка – Верхний Баскунчак для фиксированной минимальной нагрузки на ось

Таблица А.2 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т с ветром на участке Верхний Баскунчак – Палласовка и обратно в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений				
	N	\bar{x}	σ	min	max
Удельный расход топлива при движении на участке Верхний Баскунчак – Палласовка e , кг/изм	77	29,7	6,7	15,7	46,2
Удельный расход топлива при движении на участке Палласовка – Верхний Баскунчак e , кг/изм	55	31	7,7	14,8	57,3

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

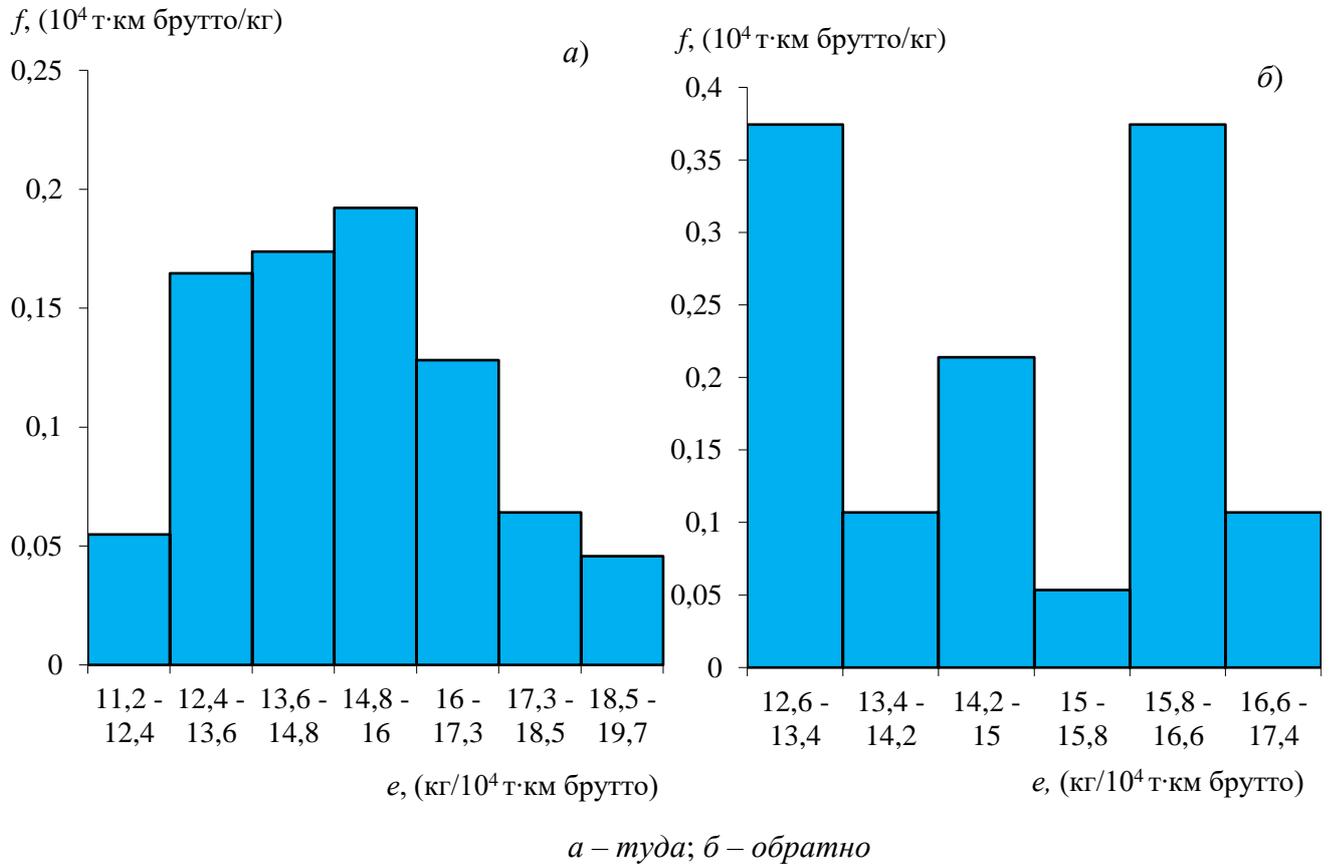


Рисунок А.3 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ без ветра на участке Палласовка – Верхний Баскунчак для фиксированной максимальной нагрузки на ось

Таблица А.3 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т без ветра на участке Палласовка – Верхний Баскунчак в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений				
	N	\bar{x}	σ	min	max
Удельный расход топлива при движении на участке Верхний Баскунчак – Палласовка e , кг/изм	90	15,1	1,96	11,2	19,7
Удельный расход топлива при движении на участке Палласовка – Верхний Баскунчак e , кг/изм	23	14,8	1,53	12,6	17,4

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

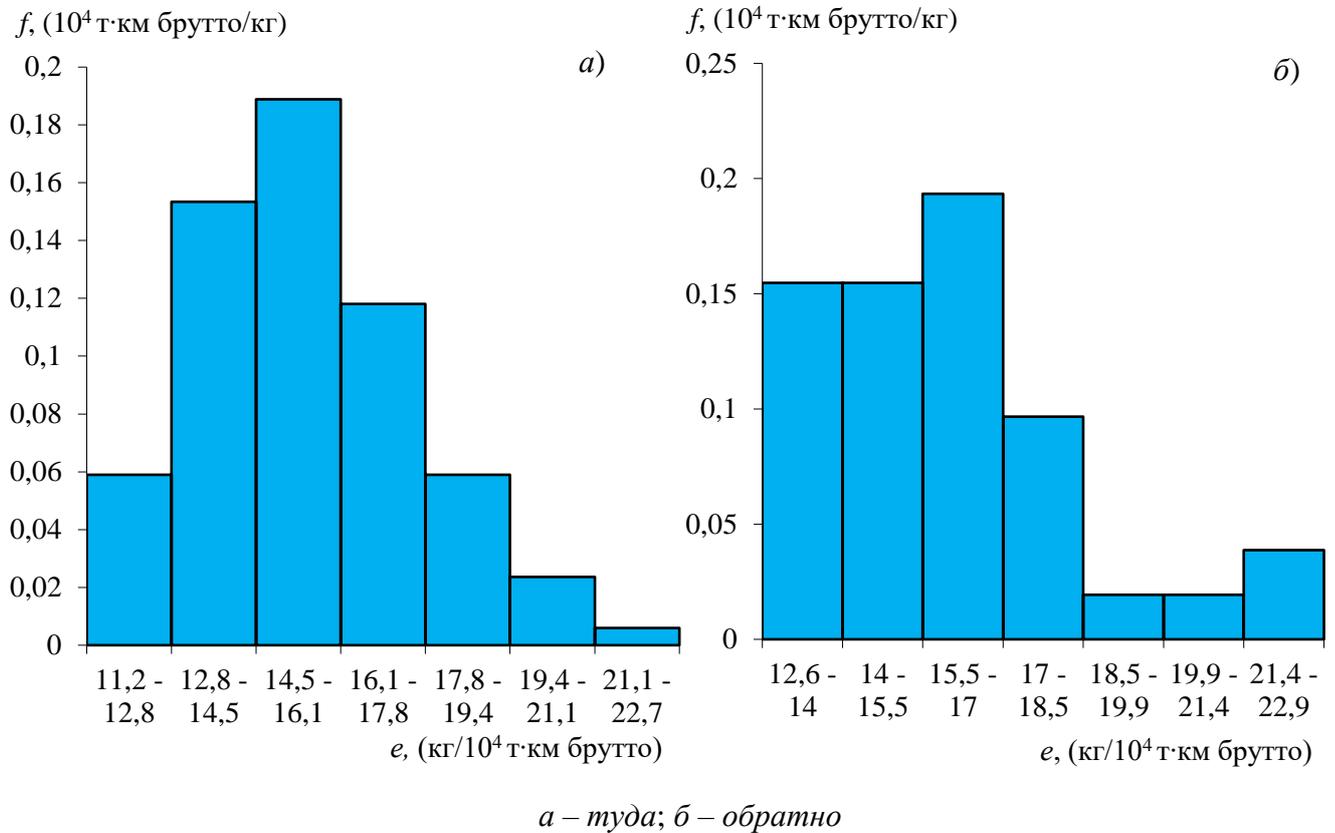


Рисунок А.4 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ с ветром на участке Палласовка – Верхний Баскунчак для фиксированной максимальной нагрузки на ось

Таблица А.4 – Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т без ветра на участке Палласовка – Верхний Баскунчак в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры статистических распределений				
	N	\bar{x}	σ	min	max
Удельный расход топлива при движении на участке Верхний Баскунчак – Палласовка e , кг/изм	103	15,4	2,2	11,2	22,7
Удельный расход топлива при движении на участке Палласовка – Верхний Баскунчак e , кг/изм	34	15,95	2,55	12,6	22,9

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор РУТ (МИИТ)
к. филол. н.



В.С. Тимонин

17 «апреля» 20 24 года

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Оценка влияния ветровых нагрузок на расход топливно-энергетических ресурсов в тяге грузовых поездов»,
выполненной Гребневым Иваном Алексеевичем, в учебном процессе

Результаты, полученные И.А. Гребневым при выполнении диссертационной работы «Оценка влияния ветровых нагрузок на расход топливно-энергетических ресурсов в тяге грузовых поездов» использованы при чтении лекций по дисциплинам «Теория электрической тяги», «Локомотивная тяга», «Электрический транспорт железных дорог. Общий курс», «Высокоскоростной наземный транспорт. Общий курс», в разделах «Основное и дополнительное сопротивление движению поездов», «Энергетика локомотивной тяги»; при чтении лекций и выполнении курсовой работы по дисциплине «Аэродинамика высокоскоростного подвижного состава, которые читаются преподавателями кафедры «Электропоезда и локомотивы» для студентов специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» специализации «Высокоскоростной наземный транспорт», «Электрический транспорт железных дорог», «Локомотивы, а также в рамках подготовки выпускных квалификационных работ обучающихся по этой специальности.

И. о. директора ИТГСУ
д.т.н., профессор

П.Ф. Бестемьянов

Заведующий кафедрой
Электропоезда и локомотивы,
д.т.н., доцент

О.Е. Пудовиков