

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»

На правах рукописи



Шелгунов Олег Олегович

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОПУТНЫХ
ТОННЕЛЕЙ НА СКОРОСТНЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ С УЧЕТОМ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 2.1.8 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Кавказский Владимир Николаевич

Санкт-Петербург – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АЭРОДИНАМИКИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЯХ НА СКОРОСТНЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЯХ	13
1.1. Обзор конструктивно-технологических и объемно-планировочных решений тоннельных пересечений на ВСМ за рубежом.....	16
1.2. Особенности аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях на ВСМ	24
1.3. Основные положения и требования к учету аэродинамических эффектов взаимодействия подвижного состава и тоннельных конструкций на ВСМ.....	27
1.4 Факторы аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях в условиях высокоскоростного движения.....	28
1.5. Обзор нормативных требований, критериев и параметров при проектировании тоннелей с учетом фактора аэродинамического воздействия подвижного состава ...	29
1.6. Развитие и совершенствование методов расчета аэродинамических взаимодействий	46
1.7. Цель и задачи исследования	52
2 ИССЛЕДОВАНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ТОННЕЛЬ – ВОЗДУШНАЯ СРЕДА – ПОЕЗД»	54
2.1. Общие положения и постановка задачи исследований	54
2.2. Методика проведения исследования аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения	56
2.3. Построение моделей тоннельных конструкций и высокоскоростного подвижного состава и порядок проведения исследований	65
2.3.1. Моделирование элементов многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд», обоснование и назначение параметров и характеристик.....	65

2.3.2. Разработка и обоснование математической модели взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».....	69
2.4. Исследование взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения.....	76
2.5. Результаты исследований, определение характера аэродинамического взаимодействия и его особенностей.....	78
2.6. Сравнительный анализ и верификация результатов моделирования с экспериментальными данными зарубежных исследователей.....	85
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ.....	90
3 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ТОННЕЛЬ – ВОЗДУШНАЯ СРЕДА – ПОЕЗД».....	91
3.1. Полный факторный эксперимент и математическая модель.....	91
3.2. Регрессионный анализ результатов исследования.....	94
3.3. Оценка степени влияния начальных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на характер и величину её аэродинамического взаимодействия.....	98
3.4. Особенности аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» и характер изменения аэродинамического давления.....	101
3.5. Обоснование критериев оптимизации системы «тоннель – воздушная среда – поезд».....	114
3.6. Обоснование значений площади поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ.....	117
3.7. Разработка рекомендаций по назначению площади поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ с учетом аэродинамики.....	121
3.8. Основные положения методики и алгоритма прогноза аэродинамических процессов в однопутных тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях.....	124

3.9. Рекомендации по расчету аэродинамических воздействий от подвижного состава в тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях	127
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ.....	130
4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ОБДЕЛКИ ОДНОПУТНОГО ТОННЕЛЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ	132
4.1. Анализ существующих мер по снижению негативных эффектов от аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях	132
4.2. Разработка конструктивного решения обделки однопутного тоннеля на ВСМ.....	139
4.3. Обоснование эффективности конструктивного решения обделки однопутного тоннеля	142
4.3.1. Исследование аэродинамических процессов в однопутном тоннеле с конструктивным решением обделки на ВСМ	142
4.3.2. Анализ результатов исследования аэродинамических процессов	144
4.4. Рекомендации по конструктивному решению обделки однопутного тоннеля на ВСМ	151
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты и справки о внедрении результатов диссертационного исследования	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из главных направлений развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации в соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р является создание интегрированных высокоскоростных специализированных железнодорожных магистралей (ВСМ) со скоростями движения поездов 250 – 400 км/ч. Зарубежный опыт свидетельствует о том, что в связи с необходимостью смягчения уклонов и увеличения радиусов кривых протяжённость тоннелей на ВСМ существенно больше, чем на обычных железных дорогах. Это значительно повышает удельную стоимость тоннелей, что обуславливает необходимость повышения эффективности методов проектирования тоннельных сооружений и их проектных решений путем оптимизации их технико-экономических параметров.

Анализ мирового опыта строительства и эксплуатации тоннелей на ВСМ свидетельствует о том, что для достижения эффективности проектных решений и обоснования экономической целесообразности необходим широкий спектр научных исследований, включающих изучение аэродинамических процессов, возникающих в тоннеле при прохождении высокоскоростного поезда, с целью обеспечения надежности конструкций, комфорта и безопасности пассажиров и экипажа.

Современные объекты инфраструктуры на ВСМ представляют собой сложные сооружения, необходимость изучения их работы в условиях аэродинамических воздействий является важной частью проектирования.

Аэродинамические явления, возникающие при движении поезда в тоннеле, могут значительно влиять на объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения тоннелей, размеры поперечного сечения, тип конструкции пути и пр. В связи с отсутствием отечественных экспериментальных данных, решение задачи об аэродинамических процессах при движении поездов со скоростью до 400 км/ч в тоннелях на ВСМ целесообразно выполнять на основе комплексного подхода, включающего математическое моделирование и расчётно – теоретический анализ аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

Полученные результаты исследований позволят разработать рекомендации для развития высокоскоростной транспортной инфраструктуры страны. Предлагаемая методика расчета аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» при движении поездов со скоростью до 400 км/ч, рекомендации по назначению величины площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поезда и конструктивное решение отделки тоннеля для снижения аэродинамического давления определяют актуальность темы исследований.

Системный подход к анализу аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» по предложенной автором методике позволит эффективно предотвращать и устранять риски в проектных решениях тоннельных пересечений на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Степень разработанности темы исследования.

Изучению особенностей опыта проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей на ВСМ посвящены труды многих отечественных и иностранных ученых и специалистов: В.Н. Кавказский, В.В. Космин, В.Е. Меркин, Ю.С. Фролов, R. G. Gawthorpe, J. Schetz, A. E. Vardy, J. Zhang и многих других.

Значительный вклад в исследование аэрогазодинамических процессов в тоннелях внесли С.Г. Гендлер, А.М. Красюк, И.В. Лугин, В.А. Плескунов и другие. Исследованием и развитием методов учета аэродинамических воздействий скоростных поездов, в том числе на объекты транспортной инфраструктуры, занимались такие ученые, как Я.С. Ватулин, С.Т. Джаббаров, С.М. Каплунов, А.В. Сетуха, Н.А. Чурков и другие специалисты ведущих институтов (ВНИИЖТ, ПГУПС, РУТ (МИИТ), СГУПС, ТГТУ, УрГУПС и др.).

Совершенствованию методов аэродинамических расчетов, экспериментальным и натурным исследованиям, в особенности тоннелей на ВСМ посвящены труды зарубежных исследователей С. J. Baker, P. Derkowski, G. Forasassi, T. Fukuda, T. Gilbert, H. Hemida, M. S. Howe, M. Iida, Y. X. Jia, H. B. Kwon, T.-H. Liu, T. Maeda, A. Martinez, Y. G. Mei, P. Reinke, P. Ricco, M. Sima, F. Sorribes-Palmer, R. Sturt, N Sugimoto, X. Wang и многих других.

Проблематика вопросов аэродинамических процессов при прохождении поездов в тоннелях с высокими скоростями является столь обширной областью исследований, что вопросы прогноза формирования и развития аэродинамических процессов требуют более обоснованных проектных решений.

Сложность аналитических решений вынуждает прибегать к различного рода допущениям, идеализирующим действительную физическую картину явления. Те же недостатки присущи традиционным методам моделирования воздействия в аэродинамических трубах, которые являются неприменимыми к решению задач железнодорожной отрасли из-за невозможности учёта свойств инфраструктуры и неинерционности используемых моделей. Среди обилия исследований встречаются различные несовершенства: отсутствие полнофакторных расчетов, пренебрежение характеристиками воздушной среды, упрощение геометрической модели поезда, моделирование тоннеля имитационной конструкцией, не имеющей ничего общего с реальными сооружениями, масштабирование моделей. Это существенно снижает точность решения задачи и достоверность результатов. Добиться эффективных решений возможно только при учете в теоретических исследованиях с большей точностью и достоверностью аэродинамических параметров среды. Поэтому особое значение приобретает разработка методики расчёта аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» с учетом отечественных норм и правил строительства и эксплуатации тоннелей. Без тщательной адаптации к условиям РФ применение основополагающих положений, используемых при исследованиях аэродинамических процессов за рубежом, невозможно.

В существующих отечественных нормативных документах причины, вызывающие негативные процессы, не структурированы и не классифицированы. Отсутствуют конкретные рекомендации по обеспечению безопасности и комфорта пассажиров. В этой связи особую актуальность приобретают исследования процессов изменения аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле на ВСМ, а также разработка конструктивных решений технических мероприятий, обеспечивающих безопасность эксплуатации однопутных тоннелей в условиях скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Цель исследования – повышение эффективности проектных решений тоннелей на скоростных и высокоскоростных магистралях за счет конструктивных мер по снижению аэродинамического давления на основе совершенствования методики его расчета.

Для достижения поставленной цели были решены **задачи исследования:**

- разработать математическую модель для численного анализа аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на высокоскоростных магистралях.

- выполнить численное моделирование аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле на высокоскоростных магистралях при различных скоростях поезда, поперечных сечениях и длинах тоннеля, а также аэродинамических параметрах среды.

- исследовать влияние основных параметров однопутных тоннелей и высокоскоростных поездов на характер аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

- разработать методику расчёта аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях скоростного и высокоскоростного движения до 400 км/ч и практические рекомендации по назначению величины площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поездов с учетом критерия безопасности.

- разработать мероприятия по снижению аэродинамического давления в однопутном тоннеле на высокоскоростных магистралях.

Объектом исследования являются однопутные тоннели на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях при движении поездов со скоростью до 400 км/ч.

Предметом исследования являются закономерности изменения аэродинамического давления в однопутных тоннелях в условиях скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Методология и методы исследования основаны на комплексном подходе к проблеме обеспечения безопасности при движении поездов по однопутным

тоннелям на ВСМ. Поставленные задачи решены с применением системы теоретических и экспериментальных исследований. Основными инструментами являются методы математического моделирования, в частности метод конечных объемов (далее МКО), реализуемый в сертифицированных специализированных CFD (*computational fluid dynamics, CFD*) комплексах с использованием методов механики сплошных сред. В работе использованы элементы вероятностно-статистического метода системного и регрессионного анализа.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- в разработке математической модели аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд», учитывающей основные конструктивные параметры тоннеля, скорости движения поездов и аэродинамические параметры среды;

- в полученных функциональных зависимостях аэродинамического давления от основных параметров однопутных тоннелей и высокоскоростных поездов, а также в установлении влияния перечисленных факторов на параметры аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при скорости движения поезда до 400 км/ч;

- в методике расчета аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях скоростного (от 160 км/ч) и высокоскоростного движения до 400 км/ч.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В методике расчета аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях движения поездов со скоростями до 400 км/ч конкретизировано влияние скорости движения, площади поперечного сечения тоннеля и его длины, а также аэродинамических параметров среды на величину аэродинамического давления. На основе методики расчета аэродинамического давления разработаны практические рекомендации по назначению площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поездов с учетом критерия безопасности, что дает возможность повысить эффективность проектных решений.

Разработано конструктивное решение обделки однопутного тоннеля на ВСМ (патент на изобретение 2683841 РФ в соавторстве с научным руководителем В.Н. Кавказским), обоснована его эффективность в снижении аэродинамического давления в однопутных тоннелях в условиях скоростного и высокоскоростного движения.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель аэродинамического взаимодействия и численные значения аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле на ВСМ при различных значениях скорости движения поезда (до 400 км/ч), площади поперечного сечения тоннеля и его длины, а также аэродинамических параметров среды;

- функциональные зависимости аэродинамического давления от основных параметров однопутных тоннелей и высокоскоростных поездов и их влияние на характер аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд»;

- методика расчёта аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях скоростного и высокоскоростного движения до 400 км/ч и практические рекомендации по назначению величины площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поездов с учетом критерия безопасности;

- новое конструктивное решение обделки однопутного тоннеля на ВСМ и результаты обоснования эффективности его применения для снижения аэродинамического давления.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением современного сертифицированного программного обеспечения при моделировании задач гидрогазодинамики методом конечных объемов, удовлетворительной качественной и количественной согласованностью результатов численного моделирования с результатами экспериментальных и натурных исследований аэродинамических процессов в тоннелях на ВСМ, выполненных зарубежными и отечественными специалистами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых, Неделя науки (СПб, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017-18 гг., 2022 г.), Международной научно-практической конференции Транспорт России: проблемы и перспективы (СПб, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2018-2019 г.), на VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (СПб, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019 г.), IV Международной научно-технической конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» чтения, посвященные памяти Лавра Дмитриевича Проскурякова (Москва, РУТ (МИИТ), 2023 г.), Международных научно-технических конференциях «Применение прогрессивных технологий в подземном строительстве» и «Освоение подземного пространства мегаполисов и транспортные тоннели» (в рамках второго Российско-Китайского семинара «Строительство и реконструкция тоннелей») (Тоннельная ассоциация России, Москва 2021 г., Казань 2023 г., Москва 2023 г.), а также на научных семинарах в ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», на научно-технических семинарах кафедры «Тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО ПГУПС (СПб, 2019 – 2023 гг.) и ФГБОУ ВО СГУПС (Новосибирск, 2021 г., 2023 г.).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и в формулировании задач; в создании конечно-элементных расчетных моделей для различных вариантов системы «тоннель – воздушная среда – поезд»; в разработке методики и алгоритма определения аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на основе системного подхода и проведении верификации результатов исследований; в обосновании и проведении исследований аэродинамического давления в однопутных тоннелях на ВСМ с новым конструктивным решением обделки (Патент РФ № 2683841).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 работ в научных изданиях, из них 2 статьи опубликованы в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, и 1 в издании,

индексируемом международной базой данных Scopus; а также зарегистрирован 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 181 страницу, включая 107 рисунков, 17 таблиц и 2 приложения. Список литературы включает 163 наименования.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю канд. техн. наук Кавказскому В.Н., а также д-ру техн. наук, проф. Фролову Ю.С., канд. техн. наук Свитину В.В. и канд. техн. наук Ватулину Я.С. за научную поддержку при работе над диссертацией.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АЭРОДИНАМИКИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЯХ НА СКОРОСТНЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

В настоящее время одним из приоритетов развития транспортной сети в развитых странах является строительство высокоскоростных специализированных железнодорожных магистралей (ВСМ), осуществляющих сообщение поездов со скоростями более 250 км/ч. Высокие скорость движения, пропускная способность делают ВСМ преимущественными перед другими видами транспорта. Как показывает мировой опыт, данные качества высокоскоростного железнодорожного транспорта могут обуславливать высокие темпы экономического развития регионов и государств.

Сейчас большая часть государств Европы (Испания, Германия, Франция, Италия, Австрия, Швейцария, Великобритания) связана едиными ВСМ (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема развития ВСМ в Европе

С середины XX века по настоящее время значительное развитие высокоскоростной железнодорожной инфраструктуры, в том числе тоннельных пересечений, отмечается в странах Азии, таких как Япония (начиная с 1964 года), Южная Корея, КНР (рисунок 1.2). КНР становится мировым лидером по динамике роста сети высокоскоростных линий, скорости движения поездов и перспективам развития [27, 137, 162, 163].

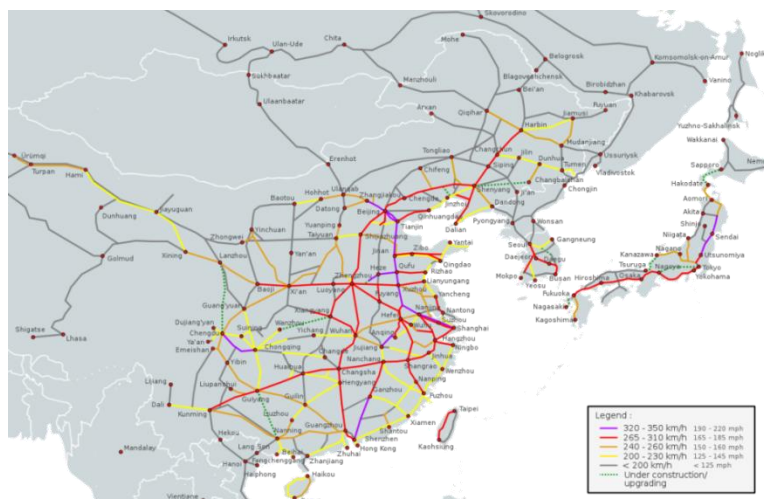


Рисунок 1.2 – Схема развития ВСМ в восточной Азии

На данный момент высокоскоростные линии со скоростями движения поездов более 250 км/ч эксплуатируются в Марокко (до 320 км/ч), Турции, Нидерландах и Саудовской Аравии (до 300 км/ч), Узбекистане, Бельгии и Дании (до 250 км/ч). В США в перспективе стоит отметить проект «Калифорния» – ВСМ, предусматривающая сообщение поездов со скоростями до 350 км/ч [91, 147].

В России по настоящее время отсутствуют ВСМ и линии с эксплуатационной скоростью поездов выше 250 км/ч. Отмечается, что «обоснование строительства ВСМ было выполнено в 70-80-е годы XX века, а научно-исследовательские работы в направлении высокоскоростного движения поездов велись до 90 – х годов, однако для осуществления масштабных проектов требуется выполнение комплексных расчётно-экспериментальных работ. Скоростное железнодорожное движение в РФ осуществляется поездами ЭВС «Сапсан» (высокоскоростной поезд Velaro RUS производства компании Siemens, регулярное сообщение между Санкт-Петербургом и Москвой с 2009 г.) Осуществлялось сообщение между Москвой и Нижним Новгородом с 2010 г. по 2015 г., затем с 2018 г. по 2022 г., и поездами «Аллегро» (высокоскоростной поезд Sm6 производства французской фирмы Alstom) между Санкт-Петербургом и Хельсинки с 2010 г. по 2022 г.» [16].

Реализация стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года нацелена на создание Национальной системы высокоскоростного движения [57]. Предусмотрено выполнение проектов по организации более 50 маршрутов протяженностью свыше 7 тыс. км [13]. Основные перспективные проекты ВСМ в России – линии Санкт-Петербург – Москва, Москва – Казань – Екатеринбург и Москва – Ростов-на-Дону – Адлер (рисунок 1.3). Сейчас

многие из маршрутов обслуживаются поездами со скоростью 140 – 160 км/ч.



Рисунок 1.3 – Схема развития ВСМ в России

Для реализации первой в России ВСМ в 2014 – 2016 годах специалистами ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I совместно с ведущими научными и проектными организациями России были разработаны «специальные технические условия (СТУ) для проектирования и строительства магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Разработка СТУ послужила значительным толчком к развитию высокоскоростного движения в России и стала основой для дальнейшего проектирования. В 2016 году, с учётом первого опыта проектирования инфраструктуры ВСМ, СТУ были актуализированы, что подтвердило их техническую необходимость и актуальность» [16, 31, 56].

«Трассирование ВСМ с минимальными уклонами и кривыми большого радиуса вызывает необходимость сооружения тоннельных пересечений, в частности, значительно более протяженных, чем на обычных линиях. В связи с требованиями по охране окружающей среды, сохранению природных ландшафтов, мест обитания редких животных и реликтовых растений, в условиях равнинного рельефа предусмотрена возможность прокладки путей ВСМ в тоннелях» [7]. Так, например, на магистрали Рим – Флоренция длиной 254 км, длина пути в тоннелях составляет 34%. Во многих европейских странах (Германия, Нидерланды) и Китае преобладают горные и равнинные тоннели. В Японии, где особенно развито строительство подводных тоннельных пересечений, их длина на некоторых магистралях превышает 50% от всей длины линии [31].

Вопросы проектирования тоннелей на ВСМ с учётом аэродинамического взаимодействия от движения поездов являются приоритетными в зарубежных научных исследованиях. При проектировании тоннелей в России на линиях со скоростями поездов не более 120-140 км/ч аэродинамические процессы практически не учитывались. Для принципиальной возможности обеспечивать движение поездов на ВСМ со скоростями до 400 км/ч необходимо не только изучение зарубежного опыта проектирования и эксплуатации тоннелей, но и развитие отечественной научной и инженерной базы в данной области. С учетом перспективного строительства ВСМ в России и выхода их в регионы Урала, Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока и Северного Кавказа такие исследования следует признать актуальными.

1.1. Обзор конструктивно-технологических и объемно-планировочных решений тоннельных пересечений на ВСМ за рубежом

Отличительной особенностью ВСМ является более высокий процент искусственных сооружений в сравнении с регулярными железными дорогами (до 200 км/ч). Тоннельные пересечения в основном представляют собой протяженные (более 10 км) сооружения. С целью рационализации затрат на строительство магистрали и искусственных сооружений на предпроектной стадии проводится технико-экономическое обоснование, позволяющее сравнивать характеристики вариантов объекта транспортной инфраструктуры. Тоннели рассматривают с точки зрения трассирования в плане и профиле, проектируемых конструкций, технологии строительства, эксплуатации, анализируют, однопутным или двухпутным будет предусмотрен тоннель. Отмечено, что при этом «не существует единого решения относительно количества путей в тоннеле на ВСМ: с позиций научных исследований, проектирования, строительства и эксплуатации однопутные и двухпутные тоннельные сооружения обладают определенными достоинствами и недостатками. Страны, эксплуатирующие тоннели на ВСМ, отдают предпочтение разным типам в зависимости от скорости движения поездов, длины тоннелей» [68].

Скорость прохождения поезда, объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения тоннелей на ВСМ являются тесно взаимосвязанными [95]. Основные варианты объемно-планировочных решений, распространенные в мировой практике проектирования и строительства тоннелей на ВСМ, отвечающие

современным требованиям безопасности, представлены на рисунках 1.4, 1.5.

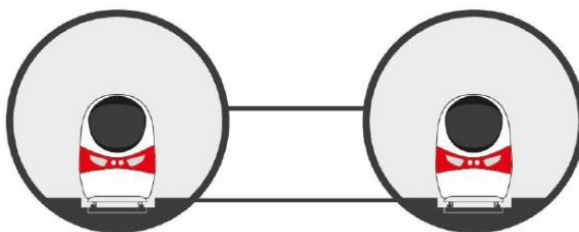


Рисунок 1.4 – Два однопутных тоннеля с поперечными сбойками

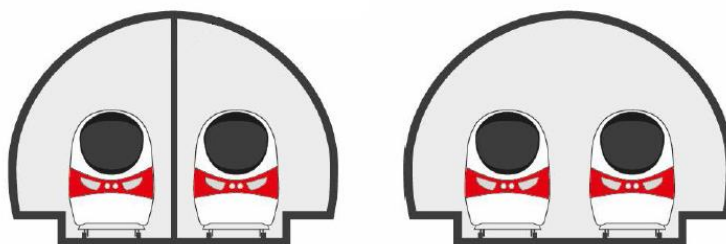


Рисунок 1.5 – Двухпутный тоннель с разделительной стеной – перегородкой и без неё

Со второй половины XX века на ВСМ сооружались двухпутные тоннели (тоннель Сэйкан, 1964 – 1988 г., Япония, рисунок 1.6). Строительство двухпутных тоннелей осуществляется и в настоящее время (Германия, Испания, Италия, Китай, Франция, Япония). Так, на линиях ВСМ в Испании (рисунок 1.7), Германии и других стран принято целесообразным устройство двухпутных тоннелей при их короткой длине (до 2-3 км): некоторые тоннели не превышают 500 м.

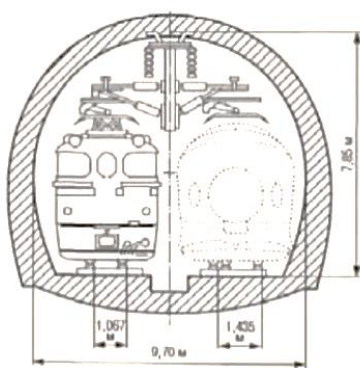


Рисунок 1.6 – Поперечное сечение двухпутного тоннеля Сэйкан (Япония, $L_{\text{тон}}=53,85$ км, $\text{Ø}_{\text{внутр.}} = 9,7$ м, $S_{\text{внутр.}} = 74 \text{ м}^2$)

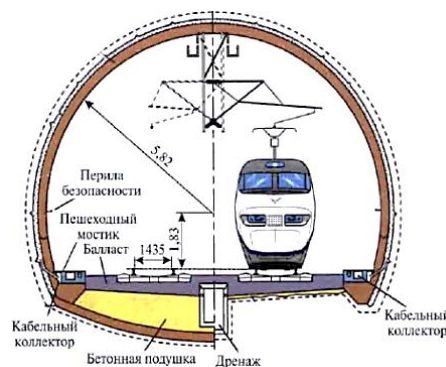


Рисунок 1.7 – Поперечное сечение двухпутных тоннелей на ВСМ Мадрид – Севилья (Испания, 1988 – 1990 г., $S_{\text{внутр.}} = 75-80 \text{ м}^2$)

При трассировании ВСМ «по кратчайшему направлению на пересеченной местности может потребоваться несколько небольших по протяженности тоннелей. Как правило, они могут быть сооружены открытым способом и представлять собой сборные или монолитные железобетонные конструкции» [7].

С ростом скоростей движения поездов отчетливее проявляются негативные аэродинамические процессы: возникновение избыточного давления, воздействие на пассажиров и экипаж, в особенности при встречном движении поездов. Для компенсации возрастающего давления и сохранения комфорта пассажиров может потребоваться увеличение площади поперечного сечения тоннеля [116], что сказывается на стоимости строительства (рисунок 1.8).

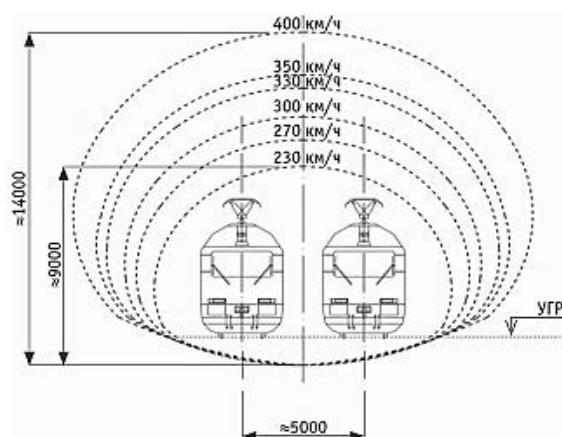


Рисунок 1.8 – Схема необходимого увеличения размеров двухпутного тоннеля в зависимости от скорости движения поездов

Отмечено, что «в связи с невозможностью исключить встречное движение поездов в двухпутных тоннелях, особенно протяженных, возрастает риск возникновения чрезвычайных ситуаций. Опыт эксплуатации показывает, что изменение аэродинамического давления в таких тоннелях при встрече поездов оказывается существенно большим, чем в однопутных, а при устройстве разделительной перегородки в междупутье сокращается площадь поперечного сечения, что влечет ухудшение аэродинамических характеристик тоннеля на ВСМ» [38, 68]. Сложности эксплуатации таких тоннелей приводили, как правило, к необходимости снижения скорости движения поездов, что означало невозможность эксплуатации линии в виде ВСМ. Впоследствии увеличение скоростей движения при сохранении прежней конструкции тоннелей и её геометрических параметров стало возможным лишь благодаря эксплуатации более герметичных высокоскоростных поездов нового поколения, например, в Японии [7, 74].

Анализ показывает, что «с точки зрения безопасности основными факторами риска в железнодорожных тоннелях – это пожар, столкновение и сход подвижного состава с рельсов. Пожар в поездах характеризуется потенциально катастрофическими

последствиями, в мировой практике принимаемые проектные решения ориентированы, как правило, на предотвращение инцидентов данного типа» [11, 30].

Однопутные тоннели на ВСМ исключают упомянутые недостатки двухпутных. Преимущества с точки зрения аэродинамических процессов, возникающих при прохождении поездов, более приемлемые условия для управления аэродинамическими воздействиями по сравнению с двухпутными тоннелями определяют перспективность совершенствования и развития тоннельных пересечений указанного типа [68]. Эти причины обуславливают строительство в большинстве стран однопутных тоннелей на ВСМ.

На данный момент наиболее протяженные и современные тоннели в мире – горный базисный тоннель Готард, 57,10 км (1993 – 2016 г., Швейцария) и тоннель под проливом Ла-Манш – Евротоннель, 50,45 км (1987 – 1994 г., Франция, Великобритания) – являются однопутными. В стадии строительства находятся горный тоннель на ВСМ Лион – Турин Мон – Де – Амбин (Франция – Италия, 2016 – 2032 г.) – два однопутных тоннеля длиной 57,5 км, при внутреннем радиусе 4,25 м и горный тоннель Бреннер (Австрия – Италия, 2015 – 2032 г.) – два однопутных тоннеля длиной 55,0 км, диаметр 9,6 м.

Готардский базисный тоннель включает в комплекс тоннельного пересечения две многофункциональные станции, при скорости эксплуатации поездов до 250 км/ч площадь поперечного сечения тоннеля составляет в среднем $57,5 \text{ м}^2$, при диаметре тоннеля от 8,83 до 9,58 м (рисунок 1.9) [69, 94].

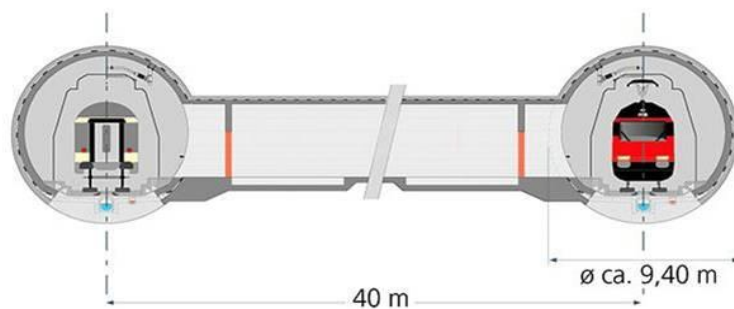


Рисунок 1.9 – Схема поперечного сечения Готардского тоннельного пересечения

Отличительной особенностью Евротоннеля, ввиду малой площади поперечного сечения тоннеля $45,4 \text{ м}^2$ при диаметре 7,6 м (рисунок 1.10), являются противодутьевые поперечные сбойки, применяемые для борьбы с возникающим избыточным давлением (рисунок 1.11).

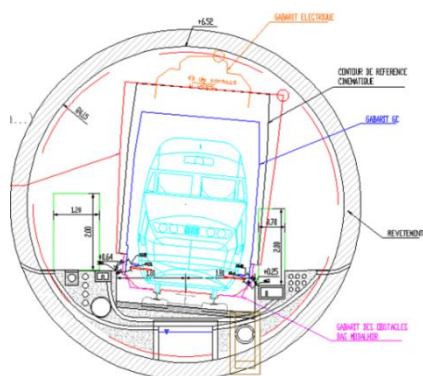


Рисунок 1.10 – Схема поперечного сечения Евротоннеля с габаритом железнодорожного автопоезда

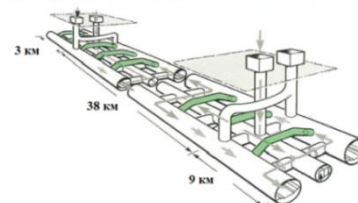
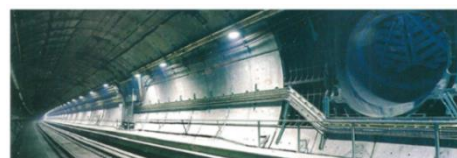


Рисунок 1.11 – Схема противодутьевых поперечных сбоек в Евротоннеле

Тоннель Гуаддарамы в Испании является тоннельным пересечением с двумя однопутными тоннелями площадью поперечного сечения $51,0 \text{ м}^2$ (2002 – 2007 г., 38 км, $\text{Ø}_{\text{внутр.}} = 8,5 \text{ м}$), обеспечивающим скорость поездов до 300 км/ч. Сооружение уникально в связи с отсутствием шахт из-за особых природоохранных требований окружающей территории, поэтому для нужд вентиляции эксплуатируются вентиляционные станции с установками системы Саккардо [125, 131]. Новый тоннель Гуаньцзяо длиной 32,65 км, сооруженный на скоростной линии в 2007-2014 годах в Китае, является однопутным тоннелем с поперечным сечением подковообразного очертания площадью 42 м^2 .

Приведенный обзор конструктивно-технологических и объемно-планировочных решений тоннельных пересечений на ВСМ дает основание считать, что «однопутные протяженные тоннели, представленные, как правило, двумя параллельными тоннелями, обладают рядом технических и технологических преимуществ по сравнению с двухпутными. В большей степени эти преимущества относятся к соблюдению требований безопасности, а именно: технологические эвакуационные сбойки, камеры аварийных остановок с эвакуационными выходами на поверхность. Следует отметить, что затраты на строительство двух однопутных тоннелей и объем извлекаемого грунта зачастую больше, чем для двухпутного варианта, сооружение сбоек представляет собой трудоёмкий процесс, сопряженный с раскрытием постоянных конструкций» [68].

На примере Китая стоит отметить паритет между строительством двухпутных и однопутных тоннельных пересечений [27, 31, 137]. При значительных темпах сооружения железнодорожных тоннелей в Китае (например,

«в 2017 году было введено в эксплуатацию 465 железнодорожных тоннелей общей протяженностью 1206 км, среди которых: 26 сверхдлинных общей протяженностью 368 км и 6 тоннелей с длиной более 15 км (сверхдлинным считается тоннель длиной более 10 км)») соотношение по количеству и длине сооружений составляет 60 на 40 процентов в пользу однопутных тоннелей [27].

В нормативной документации РФ указано, что «тоннели, как правило, следует проектировать как два однопутных тоннеля. Тоннели длиной менее 1000 м, тоннели в стесненных природных или градостроительных условиях при соответствующем технико-экономическом обосновании допускается проектировать двухпутными».

Современные требования безопасности и эксплуатации, мировая практика тоннелестроения определяют сооружение преимущественно однопутных тоннелей [74]: с 2000-х годов их количество и относительная протяженность возрастает в сравнении с двухпутными. Для сотен километров тоннельных пересечений в каждом конкретном случае применены разработанные требования и методики по определению аэродинамического давления и прогноза аэродинамических процессов.

Совершенствование тоннельных обделок ведется с учетом снижения материалоемкости и трудозатрат, улучшения технико-экономических показателей, применения инновационных решений, материалов и технологий. В настоящее время преобладают конструктивно-технологические решения в виде применения тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), высокоточных сборных обделок [39, 50], а также монолитных железобетонных и набрызг-бетонных обделок кругового очертания при сооружении способами NATM и ADECO-RS.

Принципы назначения основных параметров тоннелей на ВСМ

Конструктивные и геометрические параметры тоннелей назначают при проектировании на основании исходных данных. На длину и расположение тоннельного пересечения влияет рельеф преодолеваемой местности (места положения порталов), на поперечное сечение и его площадь – габариты (площадь поперечного сечения однопутных тоннелей метрополитенов может составлять 25–35 м², тоннелей подковообразного очертания – 35–55 м²), величина междупутья (для двухпутных тоннелей), требования безопасной эксплуатации (размещение проходов, оборудования), принципы снижения объемов работ (уменьшение разрабатываемого

сечения) и выбранный способ сооружения [37, 39]. Однако в тоннелях на ВСМ требуется учет дополнительных факторов, определяющих интенсивность аэродинамических процессов, возникающих при движении поезда в тоннеле.

Из зарубежной практики строительства и эксплуатации тоннелей на ВСМ отмечено, что «для обеспечения эффективности и экономической оправданности первостепенное значение имеют два аспекта: безопасность в тоннелях и оценка аэродинамики. Оба аспекта являются взаимосвязанными и определяющими при выборе объёмно-планировочных и конструктивно-технологических решений тоннелей на ВСМ» [31]. Существующие международные нормы ограничивают перепады аэродинамического давления за определенные интервалы времени согласно критериям комфорта пассажиров. Указанный критерий исходит из медицинских соображений, согласно которым пассажир и члены экипажа, в силу особенностей строения внутреннего уха, не имеют возможности мгновенно компенсировать перепад давления, воздействующий на барабанную перепонку [96, 97, 152, 153].

В европейских странах при окончательном назначении размеров поперечного сечения тоннелей в зависимости от скорости движения рекомендуется руководствоваться следующими соображениями: до 150 – 170 км/ч – определяющим является габарит вне зависимости от количества путей в тоннеле; до 250 км/ч – габарит и аэродинамические явления (при эксплуатации несовершенных (негерметичных) высокоскоростных и других поездов); более 250 км/ч – только аэродинамические явления.

Следует отметить, что назначение параметров поперечного сечения тоннеля первоначально определяется габаритами. На ВСМ в Азии применяемые габариты разделяют на конструкционные и габариты подвижного состава. В странах Европы, эксплуатирующих ВСМ, применяются различные габариты (рисунок 1.12).

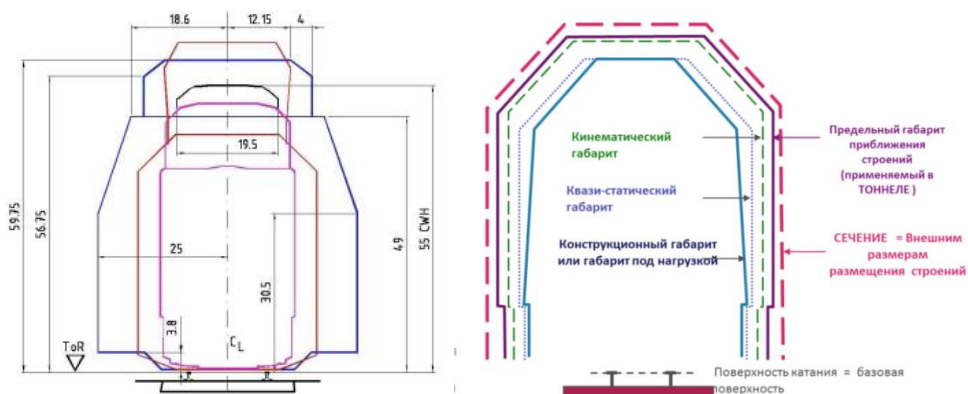


Рисунок 1.12 – Действующие габариты на европейских ВСМ

Такие конструкции эффективно применяются в Японии, Корее и других странах. Выносные порталные конструкции имеют площадь поперечного сечения в 1,3-1,5 раза большую, чем сечение тоннеля, могут быть выполнены из металла, железобетона или композитных материалов. Снижение негативного воздействия волн давления осуществляется за счет обеспечения требуемой расчетной длины, принятой формы и наличия перфораций в конструкции. Формы таких конструкций могут быть как стандартными прямоугольными, так и воронкообразными или в форме усеченного конуса. В крышах, стенах конструкций предусмотрены отверстия, через которые избыточные потоки воздуха выходят наружу (рисунки 1.15, 1.16) [32].



Рисунок 1.15 – Композитная порталная конструкция с остеклением



Рисунок 1.16 – Выносная порталная конструкция с перфорацией

1.2. Особенности аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях на ВСМ

Аэродинамические явления в железнодорожных тоннелях при скоростях более 120-160 км/ч являются специфическими, нетипичными для обычных железных дорог и линий метрополитена, где подобные воздействия отмечаются, как правило, только в виде поршневого эффекта [66]. При повышении скорости перед поездом в тоннеле формируется область повышенного давления, в носовой части возникает перепад давления, затем оно снижается по длине поезда и после прохождения поезда в тоннеле давление стабилизируется. В тоннеле условия аэродинамического обтекания поезда непостоянны: пространство между обделкой и вагонами небольшое, поэтому часть воздуха движется наружу с поездом, а часть – обтекает. Появляется разность давления между носовой и хвостовой областями, возрастает сопротивление движению поезда [49, 114, 155].

Аэродинамические процессы, проявляющиеся в тоннелях при прохождении высокоскоростных поездов, возникают в виде: перепадов статического и динамического давлений, тоннельных волн давления, волн микродавления, повышенного уровня колебаний подвижного состава и пр.

Результатом взаимодействия движущегося поезда и воздушной среды тоннеля является генерация тоннельных волн давления, со скоростью звука распространяющихся по длине сооружения, образуя комплексное воздушное поле. Массы воздуха внутри тоннеля возмущены генерируемыми волнами давления: когда волна давления достигает изменения сечения/поверхности (порталов тоннеля, движущегося поезда, другого поезда в тоннеле, сопряжений с вентиляционными стволами, сбоек и т.п.), она частично отражается, изменяя направление своего движения и характеристику сжатия/ разрежения [86, 87, 142].

Волны сжатия (разрежения) при достижении порталов тоннеля отражаются в виде обратных волн разрежения (сжатия), и процесс повторяется. Следовательно, поезд во время движения в тоннеле неоднократно встречает волны давления. Данные явления продемонстрированы на примере измерений, полученных с помощью датчика давления, установленного на обделке тоннеля: как видно на рисунке 1.17, порталы тоннеля, носовая и хвостовая части поезда генерируют в тоннеле четыре перемещающиеся волны давления.

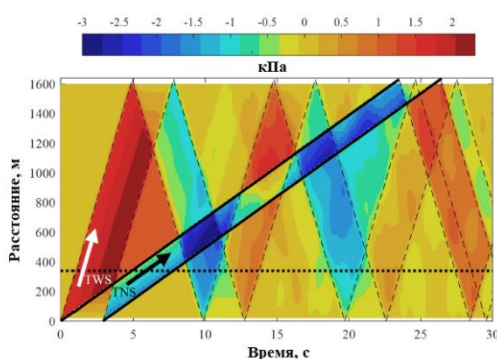


Рисунок 1.17 – Изменения давления в тоннеле длиной 1640 м при прохождении поезда длиной 200 м со скоростью 250 км/ч (сплошные линии представляют головную и хвостовую части поезда, горизонтальная пунктирная линия – датчик на расстоянии 340 м от портала, пунктирные линии – волны давления)

Колебания давления, возникающие при въезде поезда в тоннель, называются волновыми колебаниями (TWS – Train wave signature) [101]. Как показано на рисунке 1.18, три фазы изменения давления характеризуют эту часть:

ΔP_N – мгновенный положительный перепад из-за въезда носовой части поезда в тоннель (nose pressure); ΔP_{FR} – увеличение давления с гораздо меньшим градиентом из-за эффектов трения, вызванных въездом вагонов поезда в тоннель (friction pressure); ΔP_T – отрицательный перепад давления, вызванный въездом хвостовой части поезда в тоннель (tail pressure).

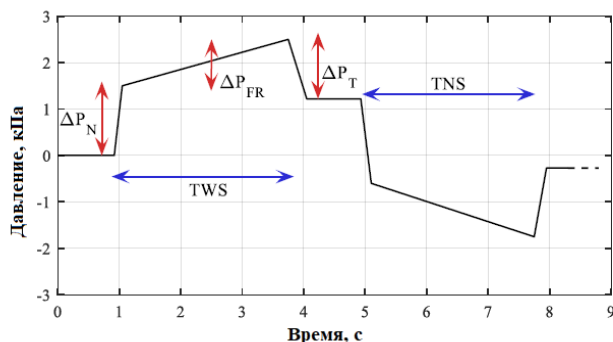


Рисунок 1.18 – Схематическое представление изменения давления, измеряемое датчиком в положении, показанном на рисунке 1.17

Как только поезд въехал в тоннель, поле давления вокруг него генерирует изменения давления, которое перемещается в тоннеле вместе с поездом (TNS – Train near field signature). Форма этого изменения давления аналогична TWS, она имеет противоположный знак, и значения перепадов давления немного больше из-за сокращения площади поперечного сечения свободной для перемещения воздушных масс. Когда поезд покидает тоннель, генерируется новое колебание TWS, аналогичное первому, которое начинает двигаться со скоростью звука в тоннель в направлении, противоположном поезду. В результате генерируется большее количество волн давления, пересекающих тоннель в противоположных направлениях, которые затем взаимодействуют друг с другом, создавая комплексное поле давления. В зависимости от различных условий амплитуда волны давления может изменяться с большей или меньшей интенсивностью.

Если амплитуда и градиент первой волны давления, вызванной высокоскоростным поездом, превышают определенные пределы, то при достижении выходного портала волна частично излучается наружу со слышимым ударом пульсационными волнами микродавления с последующим раздражением окружающей среды (рисунок 1.19). Возникает явление в виде взрывоподобного звука из портала, противоположному въезду высокоскоростного поезда в тоннель [32].

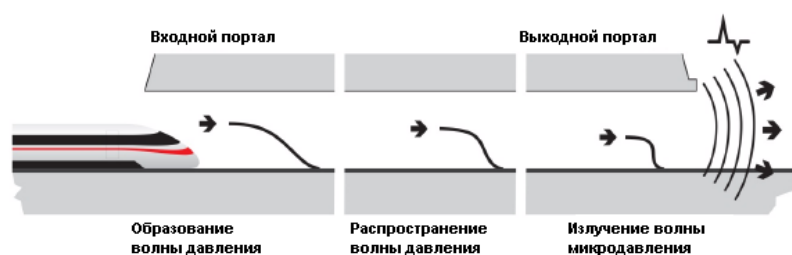


Рисунок 1.19 – Схема формирования волн микродавления

В некоторых странах на законодательном уровне нормируется уровень шума в зависимости от волн, возникающих в тоннелях. Это приводит к необходимости снижения скорости движения поезда или изменения геометрии поезда либо тоннеля путем удлинения носовой части поезда или порталных конструкций тоннеля во избежание негативного эффекта от вырывающихся волн давления. Данный вопрос не является предметом исследований в настоящей работе, поскольку он достаточно достоверно исследован и проработан на настоящий момент [78, 80, 89, 111, 146].

Повышенный уровень колебания подвижного состава при движении с высокой скоростью – особенность, наблюдаемая в двухпутном тоннеле. Первоначально причина проблемы предполагалась в укладке путей или в особенностях ходовой части поезда. Проведенные исследования установили, что в связи с несимметричным расположением высокоскоростного поезда в тоннеле на одной стороне возникает непостоянное давление, большее по величине, чем с другой [118]. В наибольшей степени процесс наблюдается после 6-го вагона состава [78, 79].

1.3. Основные положения и требования к учету аэродинамических эффектов взаимодействия подвижного состава и тоннельных конструкций на ВСМ

Турбулентные воздушные потоки переносят энергию, которая становится причиной перепадов давления и его колебаний в тоннеле. В странах, эксплуатирующих тоннели на ВСМ, аэродинамическая нагрузка учитывается как временное воздействие. В российских нормах указано: «При расчете конструкций необходимо учитывать аэродинамические нагрузки. Аэродинамическое воздействие не должно превышать 10 кПа. В расчетных схемах эту нагрузку учитывают, как временную». В отличие от международных стандартов не указано, каким интервалом времени ограничен данный перепад давления [28].

Аэродинамическую нагрузку, равномерно распределенную на конкретной площади и расстоянии, следует включать в основное сочетание, определяя

коэффициенты, исходя из требований нормативной документации:

$$q = \sum p_i + \sum \psi_q q_j + \sum \psi_v v_k, \quad (1.1)$$

где $\sum p_i$ – сумма постоянных нагрузок, Н;

$\sum \psi_q q_j$ – сумма длительных нагрузок в сочетании, Н;

$\sum \psi_v v_k$ – сумма кратковременных нагрузок в сочетании, Н;

ψ_q – коэффициенты сочетания для длительных нагрузок;

ψ_v – коэффициенты сочетания для кратковременных нагрузок.

В действующих нормативах широко рассмотрены вопросы ветровых воздействий на инфраструктуру, аэродинамических воздействий при прохождении поезда на открытом пространстве, существуют рекомендации и методики определения эквивалентных нагрузок [61].

Подход к определению нагрузки в разных плоскостях как на открытом пространстве для тоннелей неприменим, что обуславливает применение специалистами современных методов математического моделирования для решения задачи аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд». Моделирование работы каждой отдельно взятой системы является решением локальной задачи, не представляя собой общей концепции и методологии по определению аэродинамических нагрузок.

Критерии безопасности являются первостепенными при определении допустимой аэродинамической нагрузки. Определяющими параметрами в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» являются геометрические, механические и аэродинамические характеристики: лишь полнофакторное моделирование позволяет с достаточной достоверностью определять аэродинамическую нагрузку и перепады давления. В странах, эксплуатирующих тоннели на ВСМ, значения перепадов давления регламентируются как нормативами, так и рекомендациями специалистов.

1.4 Факторы аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях в условиях высокоскоростного движения

Основными факторами, определяющими особенности аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд», являются «объемно-планировочные, конструктивно-технологические и аэродинамические характеристики всех составляющих (рисунок 1.20). Рекомендации по назначению

основных параметров будут иметь важнейшее технико-экономическое значение. Учет аэродинамических эффектов обуславливает область проектирования новых тоннелей при скорости движения поездов до 400 км/ч, а также делает возможным прогнозирование явлений аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» и особенностей аэродинамических процессов для уже существующих или реконструируемых тоннелей» [31].



Рисунок 1.20 – Многофакторная система «тоннель – воздушная среда – поезд»

Многофакторная система «тоннель – воздушная среда – поезд» является взаимосвязанным объектом, в итоге назначенные параметры влияют на аэродинамическое состояние системы. Определение параметров на всех стадиях жизненного цикла тоннельного пересечения является ответственной задачей. Возникающие аэродинамические процессы в существенной степени оказывают влияние на объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения при проектировании тоннелей на ВСМ [28].

1.5. Обзор нормативных требований, критериев и параметров при проектировании тоннелей с учетом фактора аэродинамического воздействия подвижного состава

Тоннели на ВСМ являются искусственными сооружениями повышенной ответственности в отношении обеспечения безопасности движения поездов, провоза пассажиров и грузов. При проектировании тоннелей на ВСМ в зарубежных странах руководствуются нормативами: общепринятыми [153], территориальными [96, 97]. В основном рекомендации к геометрическим и механическим параметрам:

коэффициент блокирования, скорость прохождения поезда относительно требований безопасности и медицинских критериев допустимых перепадов аэродинамического давления. В зависимости от требований местных условий эксплуатации к этим критериям могут быть добавлены, например, особенности аэродинамических характеристик окружающей среды и температурный режим эксплуатации тоннеля, особенности конструкции верхнего строения пути (ВСП).

Приведение к общему критерию безопасности возможно при унификации параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд», в этом отношении наиболее практичным является документ UIC-779-11: в нём рассмотрены допустимые скорости движения поездов и коэффициенты блокирования, перепады давления в течение определенных интервалов времени, обусловленных медицинскими критериями безопасности (пример зависимости приведен на рисунке 1.21).

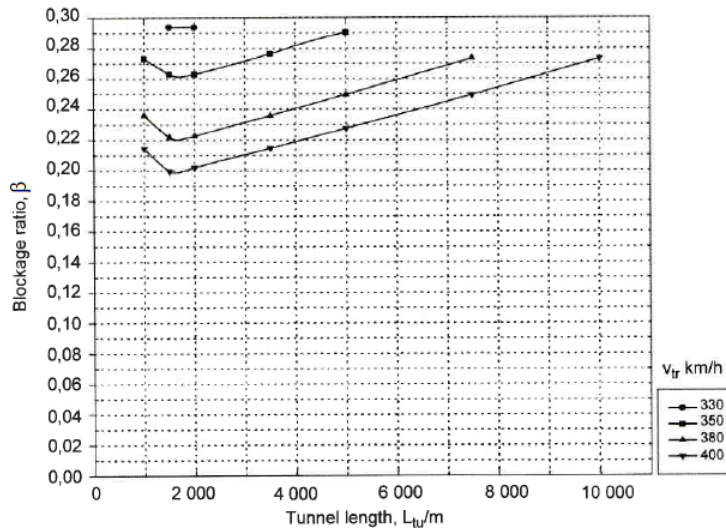


Рисунок 1.21 – Соблюдение медицинских критериев безопасности при различных коэффициентах блокирования β и длинах тоннеля при длине поезда 400 м для обтекаемого высокоскоростного поезда

Важнейшим нормируемым параметром в тоннелях на ВСП является значение перепада давления за интервал времени: это связано как с амплитудой давления, так и с критерием безопасности для оценки влияния на пассажиров и членов экипажа, так как изменение давления вне поезда может частично ощущаться внутри поезда. В соответствии с критериями безопасности и комфорта ограничены максимальные перепады давления в единицу времени (например, в течение 1, 3, 4, 5, 10 или более секунд, приведено в таблице 1.1), вызывающие минимальный дискомфорт у людей, находящихся в высокоскоростном поезде.

Таблица 1.1 – Максимально допустимые значения амплитуды аэродинамического давления в соответствии с медицинскими критериями безопасности

Источник критериев/ страна	Интервал времени, сек			
	1	3	4	10/для всего времени движения
UIC 660	0,5 кПа	0,8 кПа	–	1,0 кПа
UIC 779-11	1,0 кПа	–	1,6 кПа	2,0 кПа
Германия	0,5 кПа	0,8 кПа	–	1,0 кПа
Нидерланды	0,5 кПа	–	0,85 кПа	1,4 кПа
Италия	0,5 кПа	–	–	/1,5 кПа
Япония	0,4 кПа	–	–	/1,0 кПа
США	0,5 - 0,75 кПа	0,83 – 1,25 кПа	–	1,4 – 2,1 кПа

В нормативной документации в РФ относительно нормирования перепада аэродинамического давления при прохождении поездом тоннеля на ВСМ приведено: «За безопасный уровень максимального колебания давления принимается показатель не более 10 кПа» без упоминания об интервалах времени.

Критерии безопасности и комфорта пассажиров

Аспект безопасности и комфорта пассажиров при эксплуатации тоннелей на ВСМ является значимым: при прохождении ограниченного конструкцией тоннеля пространства с высокой скоростью поезд генерирует давление, отражающееся на находящийся в области динамического воздействия давления подвижной состав. Несмотря на особые аэродинамические конструкции поездов, зарубежные исследования показывают: давление внутри подвижного состава может изменяться пропорционально изменению давления в тоннеле, но медленнее и менее интенсивно – реальный поезд является сжимаемым [100]. Перепад давления внутри подвижного состава воздействует на пассажиров и членов экипажа: при прохождении тоннелей он ощущается интенсивнее, чем при движении на открытом пространстве.

Перепады давления в процессе движения поезда в тоннеле могут доставлять неудобства и причинить вред здоровью человека (дискомфортные ощущения: боль в ушах, а в редких случаях – кровотечение из носа), так как органы слуха не предназначены для восприятия экстремальных нагрузок и не могут компенсировать перепад давления мгновенно. Дискомфорт от изменения давления зависит не только от амплитуды давления, но и от скорости, с которой происходит это изменение.

Существующие международные нормы, по которым «максимальные изменения пикового давления в тоннеле не должны превышать 10 кПа в течение всего времени следования поезда через тоннель (т.н. «критерий безопасности»), и рекомендательные нормы в конкретных странах (т.н. «критерий комфорта») определяют допустимые перепады аэродинамического давления [153].

Для тоннелей, в которых могут присутствовать несколько поездов, критерии должны удовлетворяться для всех возможных комбинаций. Критерий относится к изменению давления снаружи поезда, влияние уплотнительной системы не учитывается. Предел медицинской безопасности действует как ограничение изменений давления, разрешенных вне поезда, предотвращающее травмы при выходе из строя системы герметизации (например, из-за разбития окна) [19, 131].

Предел давлений основан на исследованиях европейского научно-исследовательского института железных дорог [106, 153]. В Японии используется другой подход к обеспечению безопасности пассажиров: она не применяет предел медицинской безопасности и не устанавливает каких-либо ограничений на давление снаружи поезда, а вместо этого сосредотачивается на минимизации риска выхода из строя системы герметизации [74, 78, 93]. Пример влияния системы герметизации высокоскоростного поезда показан на рисунке 1.22.

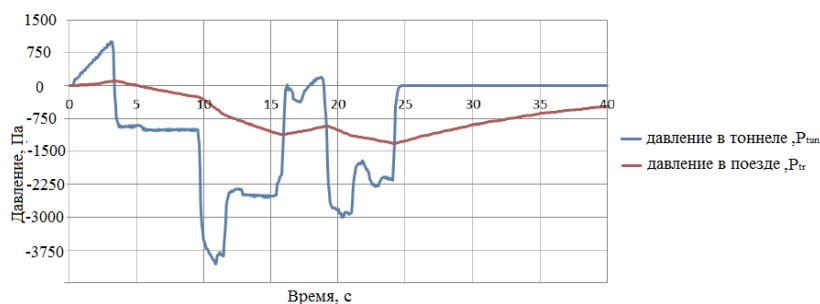


Рисунок 1.22 – Перепады давления в тоннеле (в носовой части поезда) и внутреннего давления в поезде с системой герметизации

Системы герметизации высокоскоростных поездов позволяют эффективно снижать амплитуду и скорость изменения давления, но для достижения желаемого уровня комфорта могут потребоваться другие смягчающие меры [100, 116].

Зарубежные исследователи определяют величину выравнивания давления с внешней и внутренней сторон поезда за интервал времени – каждый подвижной состав обладает своим значением, а именно временем, за которое давление внутри достигает 63% от давления снаружи (рисунок 1.23).

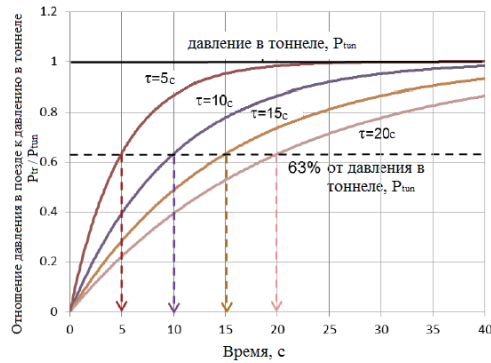


Рисунок 1.23 – График зависимости отношения давления в различных подвижных составах к давлению в тоннеле от времени, иллюстрирующий реакцию внутреннего давления в поезде на изменение внешнего давления в тоннеле

Для осуществления комфортного движения поезда в тоннеле на ВСМ следует принимать рекомендации зарубежных нормативов, наиболее строгие ограничивают перепады давления за интервал времени. В некоторых зарубежных исследованиях приводят рекомендации об ограничении перепадов давления для пассажиров и персонала за единицу времени в пределах 0,2 – 0,4 кПа/с [107].

Использование вышеупомянутых рекомендаций в расчетах сводится к ограничению величин перепадов давления за интервал времени, вне зависимости от скорости движения поезда в тоннеле.

Параметры подвижного состава

Поезд встречает самогенерируемые волны давления несколько раз в течение движения в тоннеле, он может пересекать волны давления или создаваемое другим поездом поле давления, движущимся в том же тоннеле. Суперпозиция волн давления приводит к значительным вариациям изменений давления в тоннеле, которое может распространяться в поезд. Перепад может быть меньше максимально допустимого и меньше возникающего в тоннеле вне поезда из-за системы герметизации высокоскоростного подвижного состава [151].

Герметичность поезда определяет интенсивность воздействия аэродинамического давления на пассажиров и персонал, что влияет на их адаптацию. Современные высокоскоростные поезда не являются абсолютно герметичными – пассажиры и персонал могут испытывать перепады давления, подобно воздействиям при авиаперелете, только за меньшие интервалы времени (от нескольких секунд до минут), следовательно, возникающий перепад может быть более интенсивным.

«Критерий герметичности» – интервал времени, за который давление в движущемся поезде достигает определенной величины от полного аэродинамического давления в тоннеле. Внутреннее давление зависит от внешнего давления, механизм взаимосвязи может быть представлен с помощью дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dP_{tr}}{dt} = \frac{(P_{tun}(t) - P_{tr}(t))}{\tau_{dyn}}, \quad (1.2)$$

где P_{tun} – давление в тоннеле, Па;

P_{tr} – давление в поезде, Па;

τ_{dyn} – динамическая константа времени (критерий герметичности), с.

В соответствии с UIC 779-11 и EN 14067-5 негерметичными считаются поезда, в которых $\tau_{dyn} < 1$ сек, герметичными – при $\tau_{dyn} > 1$ сек. Обосновано, что после достижения 63% от величины полного давления в тоннеле, изменение давления в поезде стремится к линейному [78]. Чем больше значение критерия герметичности (выше динамическая константа времени), тем выше комфорт пассажиров и персонала. С другой стороны, возрастает аэродинамическая нагрузка на кузов вагона за счет более высокой разницы давления между тоннелем и поездом. Предел не должен быть превышен даже в случаях отказа системы герметизации (разуплотнения) в любой точке на протяжении тоннеля и поезда.

Тяговая мощность – это мощность, необходимая ободу колеса локомотива или поезда для преодоления сил сопротивления, включая аэродинамическое. Аэродинамическое сопротивление является основным фактором на ВСМ, влияющим на энергопотребление поездов, как на открытом пути, так и в тоннеле (рисунок 1.24). В тоннеле аэродинамическое сопротивление приводит к значительно более высоким требованиям к мощности, чем на открытой трассе [3, 11, 49, 66, 155].

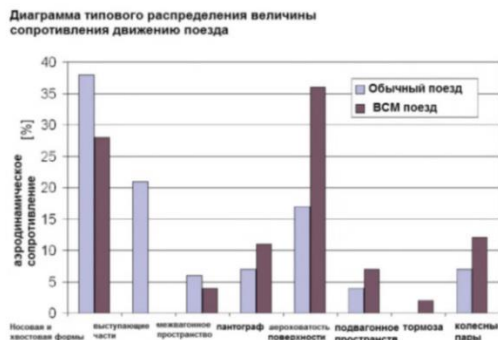


Рисунок 1.24 – Диаграмма распределения сопротивления движению поезда

Для уменьшения требуемой мощности могут быть применены следующие

меры: увеличение площади поперечного сечения тоннеля, шахты или каналы для сброса давления, снижение коэффициентов трения и особенные конструкции пути. Влияние площади поперечного сечения на инвестиционные затраты и затраты на тяговую мощность отражено на рисунке 1.25 – для заданных условий возможно определить оптимальный размер тоннеля, исходя из требуемой мощности.

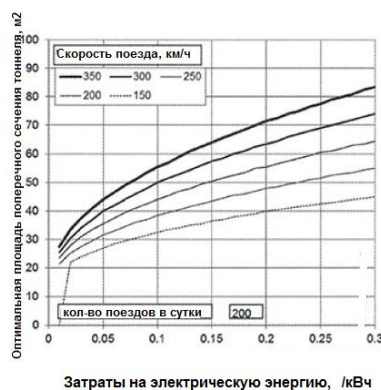


Рисунок 1.25 – Оптимальная площадь поперечного сечения тоннеля в зависимости от затрат на электрическую энергию [138]

Зарубежные нормативы, как правило, привязаны к конкретным конструкциям подвижного состава, учесть каждый конкретный тип для составления общей концепции не представляется возможным. В документе [61], учитывающем воздействия ветровых и аэродинамических нагрузок на искусственные сооружения (мосты, вертикальные, горизонтальные поверхности) предложен обобщающий принцип унификации требований к подвижному составу. В таблице 1.2 приведены значения коэффициентов уменьшения эквивалентного аэродинамического давления в зависимости от аэродинамической формы подвижного состава:

Таблица 1.2 – Коэффициенты понижения нагрузки в зависимости от типа железнодорожного подвижного состава

Тип подвижного состава	Коэффициент понижения нагрузки, k_1
Обычные поезда, неблагоприятная аэродинамическая форма	1,0
Подвижной состав с гладкими сторонами	0,85
Обтекаемый подвижной состав (ETR, ICE, TGV)	0,6

Боковые поверхности поезда испытывают трение о слои воздуха. Потери на трение зависят от шероховатости поверхностей и скорости движения поезда. Поезд, движущийся в тоннеле, с точки зрения аэродинамики является плохообтекаемым телом из-за выступающих элементов, междвагонных промежутков и т.п. Эти

особенности становятся причиной возникновения турбулентных воздушных потоков и потерь энергии на их формирование.

Рост коэффициента трения поверхности увеличивает амплитуду волны давления. Типичные коэффициенты трения Фэннинга f находятся в диапазоне от 0,0025 до 0,005 для обтекаемых высокоскоростных подвижных составов [78]:

$$f = \frac{\tau_f}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (1.3)$$

где τ_f - напряжение сдвига на поверхности, вызванное трением воздуха, Па;

ρ - плотность воздуха, кг/м³;

U - скорость воздуха относительно поверхности, м/с.

Эволюция подвижного состава играет немаловажную роль – поезда становятся более обтекаемыми, их проектируют с меньшей площадью миделевого сечения – наибольшее по площади сечение тела плоскостью, перпендикулярной направлению движения. Коэффициенты понижения аэродинамической нагрузки для носовой и хвостовой частей поезда характеризуют падение давления при прохождении поезда, и определяются, как правило, экспериментально [3, 66]. Типичные значения коэффициентов для высокоскоростных поездов находятся в диапазоне от 0 до 0,1: более низкие значения указывают на лучшую оптимизацию формы.

Геометрические параметры инфраструктуры

Распространение волн давления и их интенсивность существенно отличаются при различных значениях площади поперечного сечения и длины тоннеля. Динамическое давление в виде негативно влияющих пульсаций и ударных волн возрастает при меньшей площади поперечного сечения тоннеля. Большая длина тоннеля обуславливает большее число циклов отражения волн от порталов, однако амплитуда давления может уменьшаться при распространении волн по тоннелю.

К ВСМ предъявляются особые требования – уклоны пути и радиусы кривых нормируются строже, чем на обычных железных дорогах [5, 12, 40, 75]. Изменения давления могут происходить в тоннелях или в открытой среде из-за уклонов (изменения высоты): пассажиры испытывают перепады. Воздушный поток в тоннеле может быть вызван разницей атмосферного давления между порталами тоннеля: давление уменьшается на большей высоте, поэтому в длинном тоннеле с перепадом

высот давление воздуха постепенно меняется. Когда поезд проходит через тоннель, изменение давления из-за высот добавляется к перепадам давления от волн давления, что может вызвать более дискомфортное состояние [120, 124, 140].

Европейские нормативы [153] рекомендуют учитывать изменения давления в зависимости от высоты и уклона. Таким образом, в некоторых случаях протяженные тоннели с большими перепадами высот могут не соответствовать пределу медицинской безопасности [124]. Без проведения дополнительных исследований рекомендуется оценивать общие изменения давления, включая перепады высот: сумма не должна превышать предел медицинской безопасности.

Для ВСМ характерны более протяженные тоннели, чем на обычных магистралях. Длина тоннеля зависит от исходного рельефа: зачастую подводные тоннели оказываются протяженными, тогда как для горных характерны как относительно короткие (до 1000 м), так и протяженные (свыше 10000 м). Эффект наложения волн и их колебаний может достигать пиковых значений в зависимости от длины тоннеля и скорости поезда при его прохождении, что является немаловажным фактором при учете аэродинамических воздействий. Длина тоннеля не учитывается при расчете давления в указанных нормативах [96, 97]. Существует понятие «критическая длина тоннеля», в физическом смысле подразумевающее под собой такую длину сооружения, при которой на определенной скорости состав определенной длины генерирует волны, при отражении и наложении друг на друга создающие максимальную критическую амплитуду давления [86, 87, 96].

$$L_{tu,crit} \sim \frac{L_{tr}}{4} \frac{c}{v_{tr}} \left(1 + \frac{c}{v_{tr}} \right), \quad (1.4)$$

где L_{tr} – длина поезда, м;

c – скорость звука, м/с;

v_{tr} – скорость поезда, м/с.

Отмечено, что «исследования, проведенные в ряде стран, позволили установить зависимости изменения давления от скорости поезда и его длины. Например, в однопутном тоннеле с круговой обделкой при длине поезда 200 м и скорости 200 км/ч критическая длина составила 2178 м» [30, 141].

Такое понятие недостаточно конкретизирует тенденцию увеличения амплитуды давления. Для оценки аэродинамического давления в исследовании

принят коэффициент длины – отношение длины тоннеля к длине поезда, позволяющее сравнивать между собой относительные величины давления:

$$\lambda = \frac{L_{tun}}{L_{tr}}, \quad (1.5)$$

где L_{tun} – длина тоннеля, м.

Эффективность применения коэффициента длины заключается в возможности унификации результатов, полученных путем моделирования аэродинамического воздействия или его экспериментального исследования, с целью их достоверного определения и сравнения. С точки зрения длительности воздействия перепадов давления на человека более неблагоприятными могут оказываться протяженные тоннели, в которых происходят меньшие изменения давления, но продолжающиеся больший период времени, чем менее длинные тоннели, в которых наибольший перепад давления носит локальный моментальный характер.

Двухпутные тоннели обладают до 80% большей площадью, чем однопутные, однако аэродинамические воздействия в них (например, при встречном движении поездов) оказываются большими. Нормативная документация РФ допускает проектирование двухпутных тоннелей лишь при небольших длинах (до 1000 м).

Значения площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ могут отличаться на величину до 25 м². Приведенная площадь поперечного сечения, не зависящая от формы сечения (подковообразное или круговое очертание), является одним из основных показателей при расчетах аэродинамики тоннелей. Для приведения к общему показателю введено понятие «коэффициент блокирования» – часть площади поперечного сечения тоннеля, занятая движущимся в нем подвижным составом. Коэффициент блокирования является общепринятой величиной и определяется отношением:

$$\beta = \frac{S_{tr}}{S_{tun}}, \quad (1.6)$$

где S_{tr} – площадь поперечного сечения поезда, м²;

S_{tun} – площадь поперечного сечения тоннеля, м².

Коэффициент блокирования используется для оценки свободной для движения воздушных масс площади поперечного сечения тоннеля, позволяет соотносить данные об аэродинамическом давлении, возникающем в различных тоннелях. Указанный параметр позволяет оценить давление и его амплитуду без

привязки к конкретному подвижному составу. В современных тоннелях на ВСМ значение коэффициента блокирования определяется в диапазоне от 0,10 до 0,30.

В коротких однопутных тоннелях (при коэффициенте длины от 1 до 7) аэродинамические воздействия необходимо учитывать вне зависимости от времени, затрачиваемого поездом на прохождение тоннеля.

Механические параметры инфраструктуры

Аэродинамические воздействия от прохождения высокоскоростных поездов воспринимаются тоннельной обделкой, оборудованием, в случае объёмно-планировочного решения, включающего подземную станцию, – её конструкциями.

Традиционно обделку тоннеля анализируют с точки зрения напряженно-деформированного состояния в процессе работы системы «грунтовый массив – обделка», стадийности включения обделки в работу [24, 53, 58]. Постоянные нагрузки от горного, гидростатического давления являются основой для расчёта прочностных параметров обделки, что влияет на механические и геометрические параметры конструкции. Аэродинамические воздействия практически не влияют на напряженно-деформированное состояние конструкций: ввиду направления воздействия изнутри могут даже улучшить их статическую работу [17, 51, 115]. Восприятие обделкой аэродинамической нагрузки обуславливает назначение механических и объёмно-планировочных параметров – шероховатость, форма и площадь поперечного сечения.

Возникает трение поверхности обделки и слоев воздуха: шероховатость влияет на интенсивность тоннельных волн, их величину при продольном и поперечном распространении – мгновенном отражении воздушного потока в направлении перпендикулярном движению поезда в тоннеле, что может вызывать динамические колебания подвижного состава [101]. Шероховатость обделки зависит от её конструктивно-технологического решения – поверхность тоннеля может быть описана коэффициентами трения Фэннинга в диапазоне от 0,004 до 0,012 [78]. При расчете аэродинамических воздействий в тоннелях на ВСМ, для учета шероховатости следует применять коэффициенты трения, соответствующие реальным условиям.

В соответствии с [54, 56] с целью снижения аэродинамического воздействия: «Обделка тоннелей должна иметь улучшенные аэродинамические свойства, не иметь выступающих углов, в связи с чем: ниши и камеры в тоннеле

не устраиваются, трубы с подводимым кабелем питания освещения и слаботочных устройств утапливаются в тело обделки, внутренних конструкций тоннеля или путевого бетонного основания при условии соблюдения мероприятий по их герметизации, шкафы, проемы и ниши во внутренних конструкциях должны быть закрытыми, например, дверцами жалюзийного типа».

Выступы, резкие изменения сечения, препятствия в виде светофоров, оборудования, знаков и эксплуатационных дверей являются неблагоприятными факторами в отношении восприятия аэродинамических воздействий (рисунок 1.26). При проектировании объектов и оборудования, расположенных параллельно пути, должны быть учтены перепады давления величиной до 10 кПа.

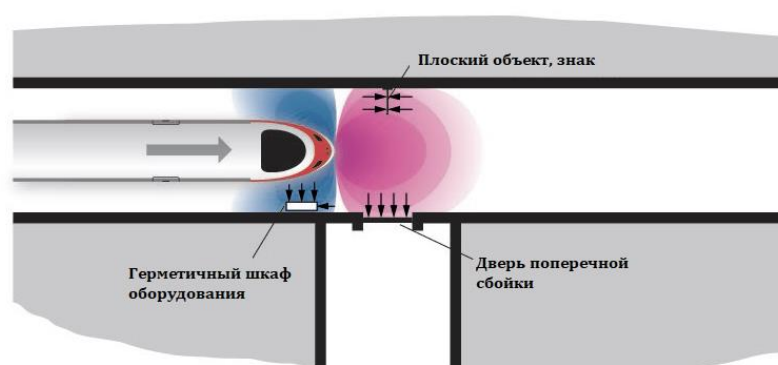


Рисунок 1.26 – Нагрузка от волн давления на оборудование в тоннеле

Давление изменяется при прохождении волн через оборудование и сохраняется до прохождения следующей волны. Нагрузку от волн давления следует рассматривать как усталостную, с учетом количества циклов нагружения разной амплитуды, ожидаемых в течение расчетного срока службы оборудования. Кроме того, предельные нагрузки должны быть рассчитаны с учетом наихудших атмосферных условий и параметров поезда [133].

Воздушный поток применительно к нагрузке на стационарное оборудование возникает из-за низкого давления в пространстве между поездом и обделкой в течение всего времени прохождения поезда. Герметичный шкаф испытывает давление на всех внешних поверхностях, твердый объект (вывеска из листового металла) испытывает одинаковое давление с обеих сторон. Затворы поперечных сбоек между однопутными тоннелями с каждой стороны могут одновременно подвергаться различному давлению. При оценке следует учитывать чистую нагрузку, т. е. разницу давления на затворы [78, 112, 133].

Трение, возникающее в тоннеле в процессе распространения, отражения волн давления, влияет на величину амплитуды давления. Интенсивность волн микродавления зависит от величины волны давления в тоннеле, дошедшей до портала.

Безбалластная конструкция увеличивает амплитуду давления за время её распространения до портала, тогда как балласт поглощает вибрации, шум [17, 77] и может снижать амплитуды волн микродавления на порталах протяженных тоннелей – это названо «балластным эффектом» [78, 104]. Длина тоннеля обуславливает изменение амплитуды давления, на которую влияет ВСП: в протяженном тоннеле при большем времени распространения и отражения волн изменение может быть существенно больше, чем в коротком тоннеле. Недостатками являются отсутствие методики расчета необходимого количества балласта для снижения аэродинамического воздействия и увеличение площади поперечного сечения тоннеля при устройстве балластной призмы. Высокие скорости движения поездов на ВСМ приводят к аэродинамическому подъёму щебня, который может наносить негативные воздействия поезду, конструкциям искусственных сооружений [77]. В существующих нормативах РФ рекомендуется применять безбалластные конструкции ВСП для ВСМ, в том числе и в тоннелях (рисунок 1.27) [21, 55]. В зарубежной практике предпочтение отдается безбалластным конструкциям, что связано с поглощением шума: в последние годы развивают акустические способы [92]. Конструкция предназначена для снижения вибрации поездов, скорости увеличения крутизны волн микродавления внутри тоннеля (рисунок 1.28).

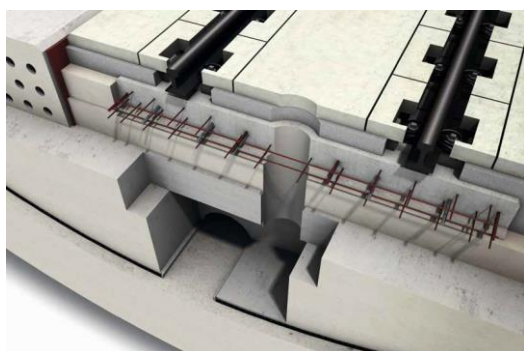


Рисунок 1.27 – Безбалластный путь из сборных элементов в тоннеле



Рисунок 1.28 – Конструкция ВСП с акустическими поглотителями

Таким образом, при проектировании тоннеля на ВСМ для принятия решения о типе конструкции ВСП следует провести оценку возможных волн микродавления. Следует учитывать, что аэродинамические явления не являются

ключевыми при выборе конструкции ВСП в тоннелях, а сопутствуют к основным принципам назначения ВСП. Коэффициенты потерь на порталах могут использоваться для расчета падения микродавления: однако в исследованиях показано, что они оказывают незначительное влияние на результаты [111,146].

Аэродинамические параметры окружающей среды

Характер аэродинамических проявлений во многом зависит от параметров воздушной среды в тоннеле. Тоннели являются особенными сооружениями железнодорожной инфраструктуры: уникальные температурный и влажностный режимы; характеристики воздушных масс внутри тоннеля могут резко отличаться от тех, с которыми взаимодействует поезд вне тоннеля. Атмосферные условия оказывают влияние на волны давления: амплитуда волны пропорциональна плотности воздуха. Скорость звука, с которой волны давления распространяются по тоннелю, меняется в зависимости от атмосферных условий.

На рисунке 1.29 при стандартном атмосферном давлении и постоянной скорости движения поезда показаны изменения аэродинамического давления при различных температурах: понижение температуры влияет на увеличение волн давления и микродавления. Температурный фактор и местное атмосферное давление с увеличением высоты расположения тоннеля влияют на давление. Максимальное давление в точке измерения на расстоянии 120 м от портала увеличивается.

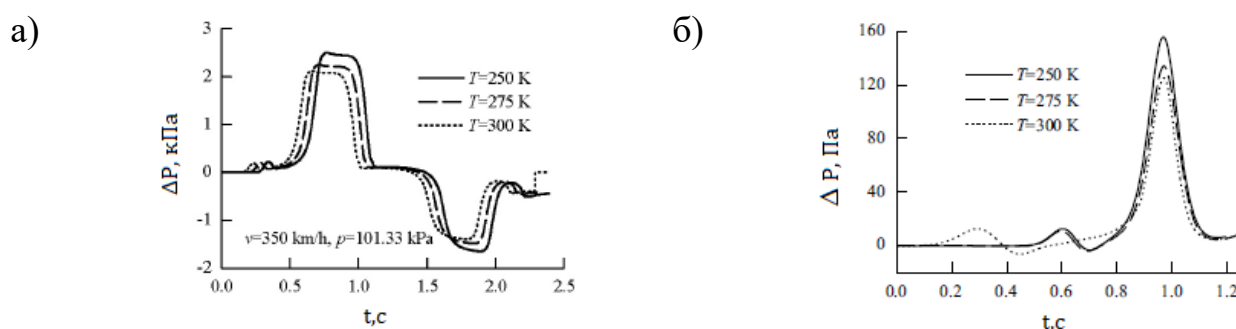


Рисунок 1.29 – Зависимость аэродинамического давления от времени движения поезда в тоннеле с постоянной скоростью при различных температурах среды:

а) тоннельные волны; б) волны микродавления

Формулы, связывающие температуру и давление с плотностью и скоростью звука, приведены в уравнениях 1.7-1.8.

$$c = \sqrt{\gamma R' T}; \quad (1.7)$$

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R'T}, \quad (1.8)$$

где γ – показатель адиабаты, 1,4;

R' – газовая постоянная для сухого воздуха, 287,05 Дж/(кг·К);

T – температура воздуха, К;

P_{atm} – атмосферное давление, Па.

Плотность и скорость звука, вычисленные по этим уравнениям, относятся к сухому воздуху: они незначительно меняются в зависимости от влажности. Если условия расположения тоннеля известны, предпочтительнее использовать их при расчетах: могут быть выбраны либо среднегодовые значения, либо наихудшие значения (высокое давление, низкая температура).

Главной особенностью аэродинамического взаимодействия поезда и окружающей среды является проявление её инерционных свойств наряду с вязкостными. Вязкостные обусловлены сопротивлением среды и, согласно д.т.н. Чуркову Н.А.: «...проявляются в условно стационарных условиях, тогда как инерционные – являются основой аэродинамики стесненных течений и относятся к нестационарным процессам. Потенциальная энергия воздушного потока, проявляющаяся в виде статического давления, в физическом смысле представляющее собой подобие гидростатического давления, действующего на погруженное тело со всех сторон, составляет лишь часть полной энергии» [18, 66]. Кинетическая энергия воздушного потока обуславливает скоростной напор – динамическое давление, пульсирующее действие на объекты инфраструктуры.

Аэродинамические параметры среды влияют на величину давления: воздух начинает проявлять свойства сжимаемой жидкости при высоких скоростях движения в нём (отношение скорости течения в данной точке газового потока к местной скорости распространения звука в движущейся среде более 0,3), что приводит к необходимости учёта вязкостных свойств воздуха. Когда поезд проходит через такое ограниченное пространство, как тоннель, из-за вязкости воздух вблизи пограничного слоя движется вместе с поездом. Динамическая вязкость показывает отношение напряжения сдвига, которое возникает, когда слои жидкости перемещаются по отношению друг к другу, и скорости, с которой происходит это движение. Динамическая вязкость увеличивается с ростом температуры. Для выражения кинематической вязкости ν используется следующая формула:

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad (1.9)$$

где η – динамическая вязкость.

При движении поезда в тоннеле возникает направленное движение воздушного потока, из-за хаотичного теплового движения возникают соударения молекул газов. Температура воздушной среды возрастает, увеличивается обмен молекулами между слоями: это приводит к увеличению вязкости воздуха, росту внутреннего трения. Вблизи поверхности обтекаемого тела силы вязкого трения выше, изменяется скорость потока, возникает пограничный слой: на поверхности тела скорость потока равна скорости тела, а по мере удаления происходит постепенное изменение скорости потока от скорости движения тела до скорости потока, обтекающего тело [78]. Обтекающий поверхность поезда поток разделяют на два слоя: пограничный, в котором проявляются силы трения (относительное движение слоев воздуха), и основной поток с постоянной скоростью, где силы вязкого трения незначительны.

При отношении скорости течения газового потока к местной скорости распространения звука в движущейся среде более 0,4 процесс течения воздушных масс происходит адиабатически:

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = const \quad (1.10)$$

При ускорении воздушного потока кинетическая энергия возрастает, воздух адиабатически расширяется, его давление, температура, плотность уменьшаются. При торможении воздух адиабатически сжимается, его характеристики возрастают (кинетическая энергия переходит в тепловую). Генерируемые высокоскоростным поездом воздушные потоки могут обладать ламинарным и турбулентным характером. Вихревое воздействие провоцирует сложные траектории воздушных потоков, способствует увеличению динамического давления.

Наиболее значимыми критериями в аэродинамических исследованиях являются: число Рейнольдса, число Эйлера, число Струхала. Число Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{Vl}{\nu}; \quad (1.11)$$

Число Эйлера характеризует отношение сил давления к силам инерции:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2}; \quad (1.12)$$

Число Струхаля характеризует инерционные гидродинамические силы при нестационарном движении:

$$St = \frac{l}{Vt}, \quad (1.13)$$

где l – характерный линейный размер, м;

V – характерная скорость, м/с;

t – интервал времени, с;

Δp – разность давлений, Па.

При определении динамических параметров передвижения масс воздуха при движении высокоскоростного поезда необходимо изучить изменение характеристик.

Влияние числа Рейнольдса на аэродинамические характеристики поезда на открытом воздухе было изучено; согласно исследованиям [127] влияние числа Рейнольдса на волну давления в тоннелях также значительно. Амплитуда давления, создаваемого поездом, проходящим через тоннель, увеличивается с уменьшением числа Рейнольдса (рисунок 1.30). Толщина пограничного слоя в одном и том же положении на поверхности поезда увеличивается с уменьшением числа Рейнольдса. Увеличение пограничного слоя вокруг поезда уменьшает эффективную свободную площадь в тоннеле, что также приведет к увеличению перепадов давления в тоннеле.

Например: «...при скорости поезда 100 м/с, стандартных атмосферных условиях (температуре $t = 15$ °С, кинематической вязкости $1,51 \cdot 10^{-5}$ м²/с) и критическом числе Рейнольдса $5 \cdot 10^5$ приблизительное значение x -координаты перехода ламинарного режима обтекания в турбулентный составляет $x = Re_{cr} \cdot \nu / v_{tr} = 5 \cdot 10^5 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5} / 100 = 0,076$ м» [62].

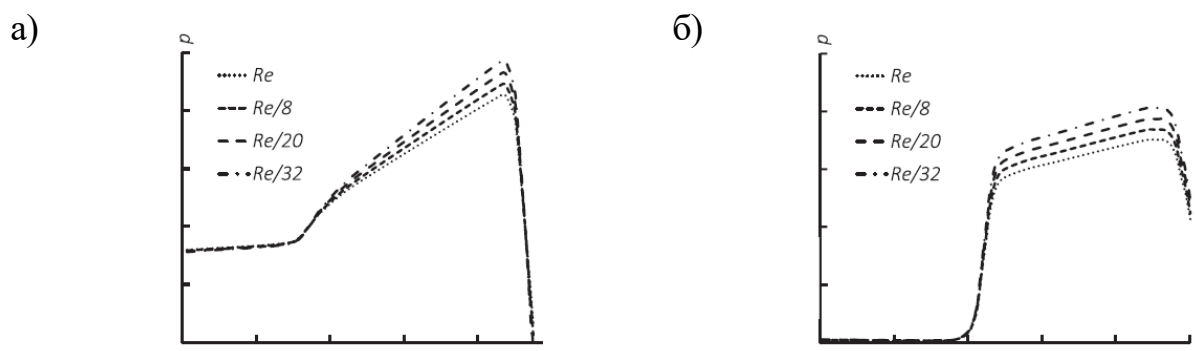


Рисунок 1.30 – Изменение волны давления в тоннеле при $Re=17,2 \cdot 10^6$: а) точка измерения на поверхности первого вагона; б) точка измерения на тоннельной обделке (250 м от входного портала тоннеля)

Приведенные параметры воздушной среды являются учитываемыми, но не нормируемыми – управление аэродинамическими характеристиками относится к вопросу эксплуатации: меры поддержания температурно-влажностного режима определяются на стадии проектирования. Применяются вентиляционные системы с режимами, позволяющими не допускать значительного повышения температуры, однако это приводит к дополнительным энергозатратам при эксплуатации [33, 44].

1.6. Развитие и совершенствование методов расчета аэродинамических взаимодействий

В период становления высокоскоростного железнодорожного движения (середина XX века) уровень техники не соответствовал необходимым средствам производства аэродинамических расчетов. Ввод в эксплуатацию первых тоннелей показал, что без предварительных расчетов для учета аэродинамических воздействий, эксплуатация тоннельных пересечений сопряжена с серьезными рисками.

Современные искусственные сооружения на ВСМ представляет собой сложные сооружения: описание и прогноз их работы является важной частью проектирования. С этой целью развивались различные методы расчетов и модели взаимодействия инфраструктуры и высокоскоростного поезда [4, 78, 88, 106, 113, 119].

Объекты, являющиеся предметом аэродинамического расчёта, анализировались в отношении характеристики обтекающего потока, характера и особенностей проявления течений. Анализ аэродинамических параметров поездов проводили подобно методам, принятым в авиастроении, судостроении: с помощью обдува в аэродинамической трубе (рисунок 1.31). Такой традиционный подход позволяет с достаточной степенью точности определять характер потока, аэродинамическое сопротивление объектов [125, 142].



Рисунок 1.31 – Тестирование в аэродинамической трубе сопротивления модели локомотива (Британская национальная физическая лаборатория, 1932 г.) [150]

Однако природа физического процесса воздействия от движущегося поезда отличается: поезд является объектом, генерирующим аэродинамическое воздействие. Процесс взаимодействия отличен характером инерционных процессов, недостаток подхода заключается в невозможности достоверного практического приложения к решению задачи аэродинамического воздействия.

Экспериментальные исследования развивались в области аналогового моделирования с помощью плоских моделей в стационарном электрическом поле, позволявших получать поля напряжения, соответствовавшие зонам распределения аэродинамического импульса. Вклад в изучение вопроса аэродинамики железнодорожного поезда в конце XX века внёс профессор Н.А. Чурков: его труды стали систематизирующими в области аэродинамики, послужили развитием научного направления. Рассмотрены вопросы аэродинамики поезда в тоннеле, предложены современные, отвечающие необходимым критериям модели аэродинамического взаимодействия поезда с воздушной средой [66].

С появлением мощной вычислительной техники для изучения поршневого эффекта в тоннелях и метрополитенах, а также при пересечении поездов в двухпутных тоннелях стали применять математическое моделирование. Эксперименты позволяли получить эмпирические зависимости распределения давления на поверхности тел, которые находятся в непосредственной близости от поезда. Численный анализ не имел системного характера, зачастую был связан с решением вопросов взаимодействия с конкретными моделями поездов и параметрами без возможности их варьирования [98, 108].

Скорость движения поездов возрастала, а комфорт пассажиров зависел от морально устаревшей и необновленной инфраструктуры, неадаптированной для современных условий эксплуатации: сопротивление движению, перепады давления значительно возрастали в тоннелях в сравнении с открытым пространством.

Развитие методов расчетов позволило изучить особенности аэродинамических процессов, совершенствовать методы исследования [102, 130]. При решении аэродинамических задач возникает множество нюансов, обусловленных переменными факторами окружающей среды, её инерционностью, особенностями течения, не проявляющимися в обычных условиях. Наряду с теоретическими совершенствовались экспериментальные [83, 105] и натурные исследования [136,

141]: полномасштабные инструментальные методы по измерению коэффициентов сопротивления [156], потерь давления в различных частях поезда. С помощью волонтеров были исследованы безопасные с медицинской точки зрения лимиты перепадов давления для пассажиров, результатом которых было назначение приемлемого предела аэродинамического давления $3\text{кПа}/3\text{сек}$ [150].

В различных исследованиях приводится широкое разнообразие моделей турбулентности [2, 9], отражающие особенности турбулентной вязкости среды, связанные с компонентами тензора скорости деформации, такие как $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST , RST [18]. Существуют унифицированные подходы, основанные на уравнениях Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds averaged Navier-Stokes Method, RANS): метод крупных вихрей LES, метод отсоединенных вихрей DES, метод дискретных вихрей МДВ, метод вихревых вязких доменов ВВД [15, 102, 108].

В настоящее время эксперименты в уменьшенном масштабе используются с целью получения данных для калибровки компьютерного моделирования [125]. Подобные испытания не применимы в качестве замены одномерного анализа, поскольку он менее трудозатратен, а лаборатория может быть недостаточно большой для размещения масштабных моделей тоннелей. Поезда и тоннели моделируются с уменьшенной геометрией (например, в масштабе 1:25), скорость модели поезда должна быть такой же, как реальная – тогда измеренное давление эквивалентно давлению, ожидаемому при полномасштабном испытании. Если запустить модель с реальной скоростью полноразмерного поезда невозможно, то для переноса результатов в натуральную величину скорость на испытательном стенде должна быть максимально близка к реальной (рисунок 1.32). Калиброванная модель затем используется при моделировании с фактической скоростью и натурными размерами.



Рисунок 1.32 – Стенд для исследования движения поезда в тоннеле [148]

Полномасштабное моделирование является более комплексным и дорогим, чем уменьшенное или компьютерное моделирование, но оно может предоставить наиболее надежные данные. Его следует использовать с целью получения данных, которые зависят от мелких деталей конструкции тоннеля, например, «затухание» волн давления; для подтверждения выводов, полученных в результате компьютерного моделирования; для проверки соответствия требованиям приемочных испытаний.

Современные тенденции в развитии методов исследования

В настоящее время существует высокий спрос на экспериментальную среду в области аэродинамических исследований. Сжимаемые и нестационарные процессы необходимо учитывать при моделировании волн давления: программное обеспечение, которое позволяет моделировать несжимаемый поток, может использоваться при расчетах вентиляции или тоннелей метрополитенов [8, 23, 34].

Изучен аэродинамический эффект при движении реального поезда в тоннеле: проведены испытания и проанализированы процессы формирования и распространения волны сжатия в тоннеле и изменения волн микродавления на входе в тоннель [135]. При объединении экспериментального исследования с численным моделированием обнаружено, что аэродинамическое давление в тоннеле является важным фактором сильной вибрации подвижного состава [144]. Сопоставлены измерения реального поезда (рисунок 1.33) и одномерный численный анализ тоннеля длиной 26 км.

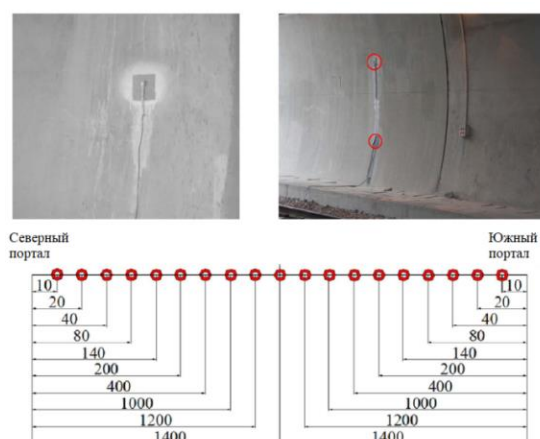


Рисунок 1.33 – Схема расположения датчиков-сенсоров динамического давления при экспериментальных измерениях в тоннелях Хикема 1 и 2 [99]

Изучен механизм распространения давления от высокоскоростного поезда в процессе въезда в тоннель с переходной (буферной) конструкцией портала: результаты

экспериментов показали возможность снижения переходного давления в тоннеле при помощи конструкции портала [121]. Для проверки аэродинамического давления на обделку тоннеля, вызванного высокоскоростным поездом в двухпутном тоннеле, применена многофакторная модель поезда, проанализированы пиковые значения давления в разных положениях при прохождении поездом тоннеля [83].

В исследовании [161] создана численная двухмерная модель высокоскоростного поезда, проходящего через аэродинамическую трубу, показано влияние шероховатости обделки тоннеля на образование волн давления в тоннеле. При моделировании волн давления, которые пересекались в тоннеле с постоянной и непостоянной скоростью, на основе CFD программного обеспечения применены алгоритмы коррекции давления трехмерных моделей сжимаемых нестационарных турбулентных потоков и произвольные подвижные сетки.. Был проведен анализ прохождения поезда через тоннель, результаты подтвердили суперпозиционную зависимость давления, но волны давления показали неудовлетворительную сходимость с результатами измерения давления на открытом воздухе [117].

Применение программных комплексов вычислительной гидрогазодинамики следует осуществлять с верификацией расчетных моделей для получения достоверных результатов расчета. На основе модели высокоскоростного поезда CRH3 было проведено исследование трехмерного нестационарного сжимаемого турбулентного потока для изучения входа поезда в тоннель [128]. Применен численный метод вычисления уравнений Навье–Стокса для моделирования переходного давления в процессе прохождения поезда через тоннель с вентиляционной шахтой, получена амплитуда давления для точек наблюдения на поверхности поезда. В работе [120] изучен аэродинамический эффект высокоскоростного поезда при въезде в тоннель: изменения высотного положения тоннеля оказывают влияние на волну сжатия в тоннеле и волну микродавления на выходе из тоннеля; с увеличением высоты волны давления на выходе из тоннеля линейно уменьшаются. Для решения проблемы аэродинамических эффектов, вызванных прохождением высокоскоростного поезда через несколько тоннелей подряд, проведен анализ поверхности поезда и участков в тоннелях с разным расстоянием между тоннелями. Исследовано влияние изменения площади и положения поперечных сбоек двух однопутных тоннелей на изменение давления.

Для конструкций порталов тоннелей были исследованы модификации в виде вентилируемых и расширенных выносных порталов [135], рассмотрено применение специальных отверстий для порталных конструкций [110]. Эффекты от положения поезда относительно оси в двухпутных тоннелях были подробно описаны в исследованиях [103], в которых было показано, что смещение поезда от центра приводит к более интенсивному градиенту начального повышения давления.

Трехмерная CFD оценка обычно не используется для анализа эффектов волны давления, поскольку явления по существу одномерны: CFD-анализ требует гораздо больше времени и трудозатрат. Использование трехмерного моделирования для тоннелей ограничивается вопросами, в которых объемные эффекты значительны (оценка новых конструкций поездов на соответствие критериям давления при входе в тоннель или конструктивных особенностей вагонов с целью снижения аэродинамического сопротивления в тоннелях [90, 114]). Анализ воздушного потока вокруг оборудования в тоннелях, позволяющий получить более точную оценку нагрузки для заданной скорости, анализ воздействия импульсов давления в носовой и хвостовой части [93, 126, 129]. Оценка волны давления при прохождении поездом тоннеля неправильной геометрии, например, при изменении площади поперечного сечения или вентиляционных шахтах, исследование порталных конструкций, предназначенных для смягчения волн микродавления [111].

К основным недостаткам исследований и методик следует отнести: отсутствие обобщенных решений, применимых не только к конкретным условиям и типам подвижного состава, но и позволяющих проводить оценку любого сооружения, отсутствие полнофакторных исследований, невозможность достоверного прогнозирования явлений, масштабирование моделей. Совершенствование методов расчета движется в направлении развития моделей, адекватно отвечающих увеличению скоростей движения поездов. Современные программные комплексы позволяют моделировать системы с необходимым количеством характеристик, что сказывается на требуемых мощностях и длительности расчета, поэтому важно на начальном этапе определить первостепенные параметры, обуславливающие физику аэродинамических процессов. Получение решений определенных задач возможно только при полнофакторных исследованиях.

1.7. Цель и задачи исследования

Тоннельные пересечения являются наиболее сложными и дорогостоящими сооружениями на ВСМ, высокие затраты на строительство тоннелей требуют более обоснованных проектных решений. Для тоннелей на ВСМ характерно повышение аэродинамического давления при прохождении поездов, поэтому аэродинамические процессы становятся важным аспектом при назначении площади поперечного сечения и длины тоннеля. Определение конструктивных параметров, которые исключают либо снижают до нормативных перепады давления, связано с расчетом аэродинамического давления. Для его прогноза применяются различные методы, однако они не лишены недостатков, которые снижают достоверность и точность оценки давления. Для решения данной проблемы необходима разработка **системного подхода** к проектированию тоннельных пересечений на ВСМ и к прогнозу аэродинамического давления с целью определения безопасных величин площади поперечного сечения и длины тоннеля – методика расчета аэродинамического давления и алгоритм назначения оптимальной площади.

В соответствии с действующей нормативной документацией тоннельные пересечения должны быть запроектированы с минимизацией аэродинамического воздействия. Однако в ней отсутствуют требования по методике подбора и назначения параметров тоннеля и конкретные рекомендации по обеспечению безопасности и комфорта пассажиров, отсутствует методика выполнения аэродинамических расчётов тоннелей на воздействие высокоскоростных поездов.

В качестве следующего шага в развитии конструктивных решений тоннельных пересечений на ВСМ, которые учитывают аэродинамические процессы, предлагается разработка варианта сборной тоннельной обделки, сооружаемой щитовым способом.

Развитие методологических подходов к обеспечению безопасности эксплуатации искусственных сооружений предполагает особое внимание к математическому моделированию при расчете аэродинамического давления.

Проведенный анализ современного состояния вопроса аэродинамики в железнодорожных тоннелях на скоростных линиях и на ВСМ, обзор особенностей аэродинамики в тоннелях на ВСМ и требований нормативно-технической документации позволили сформулировать цель и задачи исследования.

Целью исследования является повышение эффективности проектных решений тоннелей на скоростных и высокоскоростных магистралях за счет конструктивных мер по снижению аэродинамического давления на основе совершенствования методики его расчета.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследования**:

- разработать математическую модель для численного анализа аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на высокоскоростных магистралях.

- выполнить численное моделирование аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле на высокоскоростных магистралях при различных скоростях поезда, поперечных сечениях и длинах тоннеля, а также аэродинамических параметрах среды.

- исследовать влияние основных параметров однопутных тоннелей и высокоскоростных поездов на характер аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

- разработать методику расчёта аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях скоростного и высокоскоростного движения до 400 км/ч и практические рекомендации по назначению величины площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поездов с учетом критерия безопасности.

- разработать мероприятия по снижению аэродинамического давления в однопутном тоннеле на высокоскоростных магистралях.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ТОННЕЛЬ – ВОЗДУШНАЯ СРЕДА – ПОЕЗД»

2.1. Общие положения и постановка задачи исследований

Полномасштабные экспериментальные испытания аэродинамических процессов являются основой большинства исследований. Несмотря на их значимость, существует не так много примеров надежной проверки результатов, полученных численным моделированием, с данными полномасштабных экспериментальных исследований. Организационные трудности в сочетании с высокими затратами, вероятно, являются причинами того, что данные, собранные в "ТРАНСАЭРО", рассматривают в качестве эталона для полномасштабных испытаний в течение последних 25 лет, по крайней мере, в Европе [97, 105, 154].

Проблемы, касающиеся колебаний давления в тоннеле, определены в международных стандартах. Подробно процедуры испытания для оценки аэродинамического давления описаны в нормативах [96, 97], представлены пределы и целевые показатели, указанные следующим образом: пределы для значений давления; критерий здоровья для предотвращения повреждения ушей у более слабых людей (маленькие дети, люди со специфическими заболеваниями); основные критерии комфорта пассажиров и экипажа во время пересечения тоннелей; определение геометрических размеров для обеспечения совместимости системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

Вышеупомянутые критерии должны быть проверены с помощью полнофакторного математического моделирования. Процедура валидации численных экспериментов с использованием экспериментальных данных является ключевым аспектом для оценки экстремальных аэродинамических нагрузок, которые будут формироваться в тоннеле. При экспериментах такого значительного масштаба важно принимать во внимание большое количество факторов, наиболее важными из которых являются: скоростной режим поезда; параметры тоннеля; требования безопасности к проведению испытаний; наличие материально-технической базы.

Натурные исследования чрезвычайно привязаны к типу эксплуатируемого подвижного состава, к особенностям тоннеля: фактически отсутствует обобщающий подход, позволяющий привести полномасштабные данные к осредненным для возможности сравнения в различных условиях.

Имитационное моделирование развито в мире, но модели сталкиваются с теми же проблемами, что и масштабные модели, используемые в аэродинамических трубах: практически невозможно воспроизвести правильную шероховатость как верхнего строения пути, так и поезда и воссоздать все детали, характеризующие нижнюю часть кузова и крыши поезда. Различия затрудняют адекватное воспроизведение второй составляющей части давления (ΔP_{FR}). Степень герметизации поезда и результирующий критерий герметичности τ_{dyn} также невозможно воспроизвести в масштабных моделях. С появлением мощных компьютерных комплексов стало возможно решать подобные задачи на основе CFD вычислений, однако среди обилия исследований встречаются определенные недостатки [73].

Отсутствие тоннелей на ВСМ в России, а также трудоемкость натурных исследований в других странах, позволяет рассмотреть именно математическое моделирование как основной инструмент исследования аэродинамических процессов в тоннелях. Современные тенденции и развитие оборудования, его мощностей и расчетных программ делают возможным опираться на имитационное моделирование при решении исследовательских задач.

Математическое моделирование позволяет расширить возможную область исследований и поиска решений за счет широкого диапазона варьируемых параметров моделируемых систем [134]. Совокупность методов исследования проблемы избыточного аэродинамического давления при движении поездов в тоннелях позволяет более эффективно заниматься изучением возможностей снижения избыточного аэродинамического давления и разработкой способов управления вышеупомянутым воздействием.

Математическое моделирование при решении задач аэродинамического взаимодействия имеет несколько неоспоримых преимуществ: меньшие по сравнению с экспериментальными исследованиями материальные и технические

затраты, возможность полнофакторного моделирования и исследования составных элементов с широкими возможностями варьирования входных и выходных параметров. Сравнение результатов математического моделирования следует осуществлять с уже выполненными и апробированными результатами натурных исследований, которые были подтверждены.

Постановка задач моделирования

В связи с жесткими требованиями безопасности, связанными с проявлением давления в поезде и дискомфортом для экипажа и пассажиров, ограничены перепады давления за интервалы времени на всем протяжении тоннеля. Давление влияет на пассажиров из-за несовершенства системы герметизации поездов: оно может распространяться в состав, но не должно превышать 10 кПа. Ранее с целью уменьшения давления было принято увеличивать площадь поперечного сечения тоннеля, однако это дорогостоящий и нерациональный вариант решения проблемы. Совершенствование подвижного состава, изменение формы носовой части не рассматривается в исследовании, а основной задачей является рационализация площади сечения тоннеля. Площадь поперечного сечения тоннеля должна быть определена так, чтобы это не приводило к критическому перепаду давления при движении поездов, не вызывало дискомфорта у пассажиров и не приводило к избыточной свободной площади сечения [116].

2.2. Методика проведения исследования аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения

Анализ развития и совершенствования методик моделирования аэродинамических воздействий при прохождении поезда в тоннеле на ВСМ, проведенный в предыдущей главе, а также работ зарубежных специалистов, посвященных данной теме, показал, что без адаптации к условиям РФ применение основополагающих положений, используемых при исследованиях аэродинамических процессов, невозможно. Традиционные методы моделирования

воздействия в аэродинамических трубах являются неприменимыми к решению задач аэродинамики в железнодорожной отрасли по нескольким причинам: их недостатками являются отсутствие возможности учёта свойств инфраструктуры и неинерционность используемых моделей.

Одним из решений является применение успешно апробированной методики обдува моделей [46, 70]. Особенность указанной методики заключается в возможности учёта свойства как искусственных сооружений, так и поезда. Методика позволяет определять аэродинамические нагрузки на искусственные сооружения от прохождения поезда с достаточной точностью, поэтому её применимость к решению поставленных задач обоснована.

Для определения аэродинамических нагрузок на искусственные сооружения с использованием математических моделей предложен следующий подход: решение внешней задачи аэродинамического взаимодействия – определение аэродинамических параметров на поверхности модели поезда от воздействия набегающего воздушного потока; решение внутренней задачи – полученное направленное давление воздушного потока применено на поверхности модели с противоположным знаком.

Энергия воздействия воздушного импульса образуется за счет постепенного расширения ускоренно уплотненной области воздушной среды [45]. Динамическая компонента инерционного наддува воздушных масс (скоростной напор) характеризуется плотностью среды, колебания плотности среды вызывают неизбежное образование волны сжатия или волны разрежения.

Метод погруженного тела представляет собой размещение в расчетном объеме жидкости или воздуха твердой модели (поезд) с заданными свойствами движения (скорость, направление). Формирование расчетной сетки для воздушного объема и тела осуществляется таким образом, что на каждом временном интервале определяются перекрывающиеся узлы, для которых устанавливается скорость воздуха, равная скорости движения тела. Такой подход не дает возможности моделировать пограничный слой у стенок расчётной модели, следовательно – определять аэродинамическое давление на поверхности поезда достоверно. Однако

при определении аэродинамического воздействия на элементы инфраструктуры данный фактор не является принципиальным. Метод погруженного тела ставит сравнительно невысокие требования к вычислительным и временным затратам, что делает его рациональным при решении задач определения аэродинамического давления на конструкции и сооружения [25].

Метод скользящих сеток представляет собой модель из стационарной и нестационарной областей: стационарная часть является фрагментом среды, внутри которой расположены неподвижные объекты и сооружения. Внутри указанной области располагается нестационарная часть, представляющая собой фрагмент среды, внутри которой расположена модель поезда: для неё заданы свойства направления и скорости. Взаимодействие двух областей производится при помощи вращательного относительного движения (со значительным радиусом окружности, более 1000 км) расчетных областей, таким образом возможно задавать условия линейного движения модели. Данный подход предъявляет высокие требования к точности геометрии расчетных областей и моделей, к индивидуальным динамическим системам координат движущегося объекта. В каждый интервал времени осуществляется перестроение расчётной сетки, поэтому метод скользящих сеток является высокочувствительным с точки зрения вычислительных ресурсов и времени.

В основу математической модели анализа аэродинамических процессов положена система уравнений Навье–Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии среды. Энергия движущегося высокоскоростного поезда передается окружающей среде, в которой формируются воздушные потоки. Их направление и интенсивность зависят от геометрической формы обтекателей поезда (головного и хвостового), скорости движения. Взаимодействие скоростного воздушного потока с окружающими объектами может быть гладким (ламинарное движение) и вихревым (турбулентное движение) на геометрических границах объекта или границах сред. Сужение границ потока приводит к увеличению скорости его движения, при этом давление в потоке падает. При расширении границ потока скорость падает, а давление растёт.

Для расчёта поведения воздушных масс в программной среде к каждому элементарному объёму воздуха применена система уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, определяющих параметры потока: скорость, давление, плотность, температуру с учетом внешних условий:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_k)}{\partial x_k} = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i - \tau_{ik})}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho E + P) \cdot u_k + q_k - \tau_{ik} \cdot u_i)}{\partial x_k} = S_k \cdot u_k + Q_H; \quad (2.3)$$

$$S_i = S_{ipor} + S_{igr} + S_{irot}, \quad (2.4)$$

где S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды, Н;

S_{ipor} – действие сопротивления пористого тела, Н;

S_{igr} – действие гравитации, Н;

S_{irot} – действие вращения системы координат, Н;

E – полная энергия единичной массы текучей среды, Дж;

Q_H – тепло, выделяемое источником в единичном объеме текучей среды, Дж;

τ_{ik} – тензор вязкостных сдвиговых напряжений;

q_k – диффузионный тепловой поток, Вт.

Индексы обозначают суммирование по координатным направлениям.

Скоростной воздушный поток имеет два силовых параметра: давление, создаваемое потоком, подобно гидростатическому давлению, действующее на объект со всех сторон (условно статическое или квазистатическое, характеризующее потенциальную энергию); давление, создаваемое скоростным движением воздуха, как среды, имеющей массу, – динамическое давление (скоростной напор, характеризующий кинетическую энергию).

Статическое давление действует на все объекты инфраструктуры. Динамическое давление добавляется к статическому на объектах, расположенных под углом или перпендикулярно направлению потока. Встречные потоки имеют большие значения скорости и давления, взаимодействуют между собой, но их векторы

направлены в противоположные стороны. Такие потоки отталкиваются друг от друга, двигаясь в сторону свободного пространства, и, закручиваясь, стремятся вверх.

При моделировании аэродинамических воздействий следует верифицировать результаты взаимодействия поезда на открытом пространстве и калибровать модель, после чего следует осуществлять моделирование системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения с учётом параметров системы.

Модели турбулентности

Аэродинамические расчеты взаимодействия воздушной среды и высокоскоростного подвижного состава базируются на численном решении системы из трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики Навье–Стокса:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (2.5)$$

Также должны удовлетворяться уравнения неразрывности (сохранения массы) и состояния:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0; \quad (2.6)$$

$$p = \rho RT, \quad (2.7)$$

где u, v, w – искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z).

Перед расчетом следует определить начальные и граничные условия, а также возможные допущения (например, несжимаемость воздушных потоков, отсутствие учета массовых сил и т.п.). Реализация численных методов для комплексных задач базируется на возможности аналитического решения уравнений Навье–Стокса только для задач с простейшими условиями (например, течение в трубе).

Согласно современным исследованиям: «...существует множество вариантов моделей турбулентности: полуэмпирические методы на основе

осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, метод моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation), прямое численное моделирование (DNS – Direct Numerical Simulation) и гибридный метод, включающий прямое моделирование и моделирование крупных вихрей, а также более современные модели [14, 47, 63].

Метод прямого численного моделирования основан на численных решениях полных уравнений Навье–Стокса при отсутствии упрощений, так как метод DNS опирается на описание турбулентных течений трехмерными уравнениями Навье–Стокса. При существующих возможностях вычислительных технологий метод применим для малых скоростей потока и расчетных областей [60].

Моделирование крупных вихрей, отсоединенных вихрей (DES – Detached Eddy Simulation) реализуется при помощи фильтров для вывода уравнений разрешимых масштабов [15, 60, 84]. Из-за мелкомасштабной турбулентности, малой величины рейнольдсовых напряжений турбулентность исключается из расчета. LES сложно моделировать из-за включений слишком малых пристеночных вихрей – размеры энергоемких и диссипатирующих вихрей совпадают, это приводит к ограничению числа Рейнольдса, уменьшает число расчетов возможных задач для специалистов.

Сочетание LES и RANS моделей (соотношения находятся в зависимости от характера течения области потока) реализует DES моделирование [47] – метод, который существенно снижает трудоемкость расчетов. Около пограничного слоя моделирование вихрей осуществляется интегрально, а отсоединенные вихри детализируются, при этом плотность сетки необходимо понижать. Комбинацией DES и RANS, реализуется модель SAS DES [22, 52], особенность которой в гибком изменении размерности учитываемых вихрей в процессе итераций».

Наиболее практичным и удобным в использовании является полуэмпирический подход, базирующийся на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$ и на переходе к решению "осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса" (Reynolds averaged Navier-Stokes Method, RANS) [52]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.10)$$

где \bar{p} – средние давления, индексы $i=1,2,3$ и $j=1,2,3$ соответствуют координатам x,y,z . Сдвиговые (рейнольдсовы) напряжения $\overline{\rho u'_i u'_j}$ являются дополнительными неизвестными к параметрам осредненного движения (\bar{u}_i, \bar{p}) и аппроксимируются, как правило, по гипотезе Буссинеска:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (2.11)$$

где μ_t – дополнительная вязкость (турбулентная), Па·с;

k – кинетическая (объемная) энергия турбулентных пульсаций, м²/с².

Автор отмечает, что «...метод практичен с точки зрения отсутствия необходимости расчета случайных характеристик турбулентности при интегрировании трехмерных нестационарных уравнений Навье–Стокса, тем не менее, из-за присутствия в уравнении тензора рейнольдсовых напряжений и вектора турбулентного теплового потока, система остается незамкнутой и требует дополнительных соотношений, которые могут быть определены только с помощью эксперимента, – они называются моделями турбулентности для напряжений Рейнольдса» [52].

Ранее среди RANS более популярными моделями турбулентности были двухпараметрические модели, базирующиеся на рассмотрении кинетической энергии турбулентных пульсаций k . Второе уравнение имеет либо выражение переноса скорости диссипации энергии ε , либо удельной скорости диссипации энергии ω . Такие модели носят название « k - ε » и « k - ω » [26, 60, 145].

Модель « k - ε » основывается на предположении о скорости диссипации:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L}, \quad (2.12)$$

где L – характерный размер вихрей, м.

Турбулентная вязкость определяется как:

$$\mu_t = p C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.13)$$

где C_μ – эмпирическая константа.

Уравнение для k имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial k}{\sigma_k \partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - p \varepsilon. \quad (2.14)$$

Уравнение для ε имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x_j} \right) + C_{s2} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - p C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2.15)$$

Модернизированная модель « k - ω » по Wilcox [159, 160] имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t \partial k}{\sigma_k \partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - p k \omega. \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t \partial \omega}{\sigma_\omega \partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \beta p \omega^2. \quad (2.17)$$

Известно, что «в 1993 г. Ф. Менгер разработал гибридную модель, которая основывается на комбинации « k - ε » и « k - ω ». Благодаря тому, что « k - ε » с высокой точностью описывает сдвиговые течения при удалении от поверхности, а « k - ω » предпочтительна при моделировании пограничного слоя, в модели SST (shear stress transport, перенос сдвиговых напряжений) моделируются с высокой эффективностью как пристеночные области, так и зоны, удаленные от стенки с переходом между ними с помощью стыковочной функции. Универсальность данной модели позволяет использовать ее для множества сложноорганизованных градиентных потоков» [46]. Модель SST принята в настоящем исследовании.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \tilde{\alpha} \frac{\omega}{k} P_k - \tilde{\beta} \omega^2 + (1 - F_1) \frac{2}{\sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right], \quad (2.19)$$

где ω – удельная энергия диссипации;

F_1 – переходный коэффициент, не указанные параметры – эмпирические константы.

Пограничный слой может иметь ламинарный или турбулентный режим течения в зависимости от характера движения среды. При ламинарном режиме в объеме слоя микротечения перемещаются параллельно, не пересекаясь. При турбулентном режиме микротечения могут перемешиваться, поля скоростей распределяются неравномерно. Сила трения потока на поверхности, пропорциональная градиенту скорости течения вязкой среды, может быть в разы больше при турбулентном режиме, чем при ламинарном. Процесс перехода ламинарного режима в турбулентный происходит на определенном расстоянии от поверхности: чем больше скорость, тем ближе точка перехода (скорость и соответствующее ей число Рейнольдса называются критическими) [6, 26, 76].

Пограничный слой, сонаправленный с движением поезда, взаимодействует с воздушным потоком вокруг движущегося тела. Толщина увлеченного слоя по поверхности постоянна (соответствует скорости движущегося тела), но значительно развивается в областях криволинейных поверхностей. В таких зонах возникает резкое торможение частиц среды (снижение кинетической энергии частиц), поэтому они могут быть увлечены в любом направлении (образование возвратных течений у поверхностей). Отрыв пограничного слоя и воздушных потоков может привести к формированию вихрей вращения [76].

Каждый из рассмотренных методов имеет свою пространственную сетку расчетной области. Мировая практика проектирования и строительства тоннелей на ВСМ свидетельствует о том, что в настоящее время эффективным инструментом являются методы численного моделирования подобных задач, в частности метод конечных объемов. Метод конечных объемов (далее МКО) является наиболее приспособленным к моделированию гидрогазодинамических процессов, не требующий детализированного моделирования пограничного слоя в отличие от метода конечных элементов, более подробно описывающий расчетные области, чем метод конечных разностей. Одна из ключевых характеристик МКО, позволяющая решению удовлетворять интегральным балансам даже на грубой сетке, основывается на интегральном сохранении массы, количества движения и энергии на любом объединении контрольных объемов и на всей расчетной области, при этом

число узловых точек может быть любым. Размер сетки в МКО носит условный характер, но для достаточной точности решения минимальное количество ячеек составляет около 10-20. В практике моделирования стандартными являются 1–10 см на поверхности поездов, в нескольких метрах от поезда – до 100 см. Эффективность применения подобных методов подтверждена многочисленными работами, опубликованными в трудах российских и зарубежных специалистов [36, 80].

Каждый объем является ячейкой расчетной сетки, узлы сетки – это точки многогранника, в центре осуществляется вычисление искомой величины. Решение аппроксимируется в пределах определенных областей разных размеров, одновременно изменяется число точек интегрирования. Интеграция дифференциального уравнения возникает по каждому контрольному объему. Для формирования дискретного аналога балансового уравнения кусочно-непрерывными функциями определяются интегралы, необходимые для описания переменных между узлами.

2.3. Построение моделей тоннельных конструкций и высокоскоростного подвижного состава и порядок проведения исследований

2.3.1. Моделирование элементов многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд», обоснование и назначение параметров и характеристик

Экстремальные аэродинамические эффекты от воздействия поезда возникают при определенном сочетании аэродинамических, геометрических и механических параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд». Вследствие резкого изменения значений аэродинамического давления первостепенной задачей становится адекватное определение параметров системы. Опыт экспериментально-теоретических исследований показывает, что даже малые допущения при определении параметров могут привести к недооценке аэродинамических факторов, возникающих при движении поезда в тоннеле, либо к их переоценке, что может привести к увеличению стоимости строительства сооружения, его эксплуатации.

При формировании расчетных моделей особое внимание следует уделять назначению механических, геометрических и аэродинамических параметров элементов системы «тоннель – воздушная среда – поезд». В расчете следует рассматривать не фиксированные значения, например, скорости движения поезда, коэффициенты блокирования и длины, а возможные диапазоны их изменения.

На точность расчета влияет корректное выполнение моделирования пограничного слоя. При нестационарной постановке возможно применение автоматического установления пограничного слоя: осуществляется разгон неподвижного объекта с использованием нулевых начальных условий. Однако применение такого способа провоцирует существенный рост временных затрат: возникает потребность в выполнении подготовительного этапа, связанного с разгоном модели. Указанные недостатки отсутствуют при использовании квазиустановления, где исходные условия нестационарной задачи – распределение давлений и скоростей в пограничном слое определяются при решении задачи в стационарной постановке. Необходима подробная сетка у поверхностей движущегося объекта для достоверности решений, что предъявляет высокие требования к вычислительным мощностям [65].

Порядок проведения экспериментов

Основная задача планирования экспериментов заключается в минимизации затрат времени и средств на эксперимент, повышении достоверности получаемых результатов, в назначении числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Оптимизация параметров математического моделирования многофакторных задач, в данном случае – первостепенных факторов влияния на аэродинамические процессы в зависимости от различных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд», должна быть осуществлена с учетом выбора приемлемого оптимального плана эксперимента.

Первым этапом построения оптимального плана является определение вида математической модели. На этом этапе определяют количество входных

параметров и предполагаемые зависимости между ними, характер их влияния на выходные параметры. Вид модели определяет и количество уровней варьирования – это количество точек в интервале изменения параметра $X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}$. Количество уровней для каждого параметра определяется из расчета $k = \text{предполагаемая степень параметра} + 1$.

В планировании эксперимента используются кодированные значения параметров, приведенные к интервалу изменения $[-1,1]$ следующей кодировкой:

$$X_k = \frac{2X_k - (X_{kmax} - X_{kmin})}{(X_{kmax} - X_{kmin})} \quad (2.20)$$

Такая кодировка упрощает алгоритмы построения оптимальных планов, делает их более устойчивыми и кроме того позволяет использовать один и тот же план для экспериментов, имеющих различные области изменения параметров.

Критерии оптимальности планов регрессионных экспериментов принято подразделять на две группы: к первой из них относятся критерии, связанные с точностью оценивания коэффициентов регрессии, ко второй – со свойствами эмпирического уравнения регрессии (т.е. с ошибкой в оценке модели). Наибольшее применение среди критериев первой группы имеют: D-оптимальность; A-оптимальность; E-оптимальность; ортогональность. К критериям оптимальности второй группы относятся: G-оптимальность; Q-оптимальность; ротатабельность.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней параметров, называется полным факторным экспериментом (ПФЭ). Планы, построенные с использованием ПФЭ, могут удовлетворять всем критериям оптимальности. Планы позволяют построить точные модели, однако содержат большое количество опытов, поэтому область их применения ограничена.

В качестве метода планирования эксперимента принят критерий оптимальности первой группы, а именно D – оптимальный план. Для решения большинства многофакторных исследовательских задач данный критерий позволяет получать планы с достаточными (точными с доверительной вероятностью 0,95) характеристиками. D – оптимальному плану соответствует наибольший на множестве планов определитель информационной матрицы (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Несимметричный квази – D – оптимальный план для трех переменных (трехстепенной полином)

№№	Входные параметры		
	x_1	x_2	x_3
1	1	1	0,33
2	1	0,33	1
3	-1	-0,33	-0,33
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	-1	1	-1
7	1	-1	1
8	-1	0,33	0,33
9	-0,33	-0,33	-1
10	1	-1	-1
11	-1	1	1
12	-1	-1	-1
13	-0,33	1	-0,33
14	0,33	-1	-0,33

Эллипсоид рассеяния оценок параметров для D – оптимального плана имеет минимальный объем. Для решения задач оптимизации и регрессионного анализа многофакторных исследований D – оптимальность является наиболее приемлемым критерием [1, 35, 43]. В качестве критерия оптимальности синтезируемого плана выступает определитель нормированной информационной матрицы, где максимум соответствует критерию D – оптимальности.

С помощью вышеупомянутого плана реализуется оптимизация решения задач взаимодействия многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд». При этом план позволяет построить зависимости между величинами входных и выходных параметров математической модели.

2.3.2. Разработка и обоснование математической модели взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд»

Многофакторная система «тоннель – воздушная среда – поезд» должна быть описана параметрами, которые включают аэродинамические, геометрические и механические факторы. Все параметры моделируемой системы назначены в соответствии с матрицей планирования экспериментов и поставленными задачами и целями исследования. Аэродинамические факторы и выходные параметры, давление и нагрузки определены в соответствии с требованиями существующих нормативов.

Входными и выходными параметрами системы «тоннель – воздушная среда – поезд» являются:

– геометрические характеристики системы: габарит С400т, определяющий поперечное сечение тоннеля; значения площади поперечного сечения в соответствии с СП и их интервальные значения в соответствии с матрицей планирования; геометрические характеристики высокоскоростного подвижного состава; длина тоннеля и поезда в зависимости от коэффициента длины; коэффициент блокирования и коэффициент длины (безразмерные величины, показывающие отношение площади поперечного сечения и длины поезда к соответствующим значениям величин параметров тоннеля);

– механические характеристики: скорость движения поезда (160-400 км/ч); коэффициенты шероховатости (коэффициенты трения поверхности); коэффициент аэродинамического сопротивления поезда (снижение давления в носовой и хвостовой части поезда); коэффициент шероховатости конструкций тоннеля; тип конструкции верхнего строения пути;

– аэродинамические характеристики: значения температуры, влажности, вязкости и плотности воздушной среды; давление и скорость воздушной среды; локальные перепады давления в течение интервала времени; экстремальные значения давления.

При параметрическом моделировании системы «тоннель – воздушная среда – поезд» опыт зарубежных исследователей учитывается при назначении

механических параметров и определении аэродинамических характеристик. Данный анализ будет проведен с целью верификации полученных результатов моделирования на последующих стадиях исследования.

Обоснование модели подвижного состава и моделирование аэродинамического воздействия

Высокоскоростной подвижной состав является сложным техническим транспортным средством, моделирование которого представляет собой комплексную задачу. Моделирование всех конкретных типов эксплуатируемых высокоскоростных составов не представляется возможным, так как каждый отличается своими геометрическими и механическими особенностями. Решение задачи аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» выполнено по аналогии с рекомендациями, изложенными в ТКП EN 1991-1-4-2009 (02250) ЕВРОКОД 1 [61]. При моделировании и расчете аэродинамического взаимодействия поезда с открытой средой ввиду невозможности учёта абсолютно всех разнообразных типов подвижного состава, используется аэродинамический критерий на основе аэродинамической формы и обтекаемости поезда. Для этого к нагрузке, которая возникает при прохождении поезда, применяются коэффициенты, обуславливающие воздействие того или иного вида подвижного состава с точки зрения его аэродинамической формы (таблица 1.2).

Высокоскоростные поезда отличаются усовершенствованной аэродинамической формой и обтекаемостью, которой не обладают обычные железнодорожные поезда. Отличительные особенности обусловлены различными формами головной и хвостовой частей поездов, конструкциями междвагонного, подвагонного пространств, устройствами электроснабжения и электропитания, колесных пар, воздухозаборников, обтекателей. Существует множество нюансов, характеризующих детали подвижного состава, однако отмечено, что некоторая часть этих элементов не является значимой при определении физического характера взаимодействия с окружающей средой и проявления аэродинамических

эффектов. Пренебрежение некоторыми элементами поезда допустимо при определении значений нагрузки и давления [79, 85].

При моделировании подвижного состава были внесены некоторые допущения и упрощения. За основу геометрических и механических параметров был взят эксплуатируемый в РФ ЭВС «Сапсан» (эксплуатируются на скоростных и высокоскоростных магистралях Китая (CRH-3), Германии (ICE-3), Испании (AVE S-103), Великобритания (BRC-374)). При этом для сокращения расчетных элементов и времени расчета моделирование предусматривало ряд упрощений конструкции поезда.

Принятая имитационная модель поезда обладает всеми необходимыми для расчета аэродинамического взаимодействия геометрическими и механическими параметрами, влияющими на систему «тоннель – воздушная среда – поезд». Аэродинамическая форма и обтекаемость состава принята как для высокоскоростного поезда с коэффициентом понижения аэродинамической нагрузки 0,85, и необходима для подтверждения в процессе верификации результатов моделирования и отладки модели. Пример модели подвижного состава с элементами расчетных сеток представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Пример модели подвижного состава с элементами расчетных сеток

С целью верификации результатов моделирования внешней задачи аэродинамического взаимодействия поезда и окружающей среды, для рассмотрения возможности последующего моделирования взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд», были определены следующие входные и выходные параметры исследования внешней задачи.

Геометрические и механические параметры подвижного состава: площадь поперечного сечения, длина обоснована возможностью варьировать указанный параметр благодаря коэффициенту длины системы «тоннель – воздушная среда – поезд» (модель не включает в себя промежуточные вагоны полноценной длины состава (10-20 вагонов) с целью сокращения времени расчета, что является обоснованным допущением [79, 158], позволяет эффективно использовать вычислительную технику). Детальное определение шероховатости объекта 5-10 мкм. Поверхности подвижного состава представляют собой нескользкие стенки.

В исследовании приняты следующие скорости движения поезда: 160 – 400 км/ч (44,44 – 111,11 м/с), для верификации модели в пределах 160 – 350 км/ч, для исследования – 250 – 400 км/ч. Значения параметров окружающей среды: давление – 101,325 кПа, температура 293 К, учтены вязкость и относительная влажность, принята модель турбулентности SST.

Оценка результатов и верификация модели

На рисунках 2.2–2.5 приведены графические материалы, полученные по результатам моделирования взаимодействия поезда со средой.

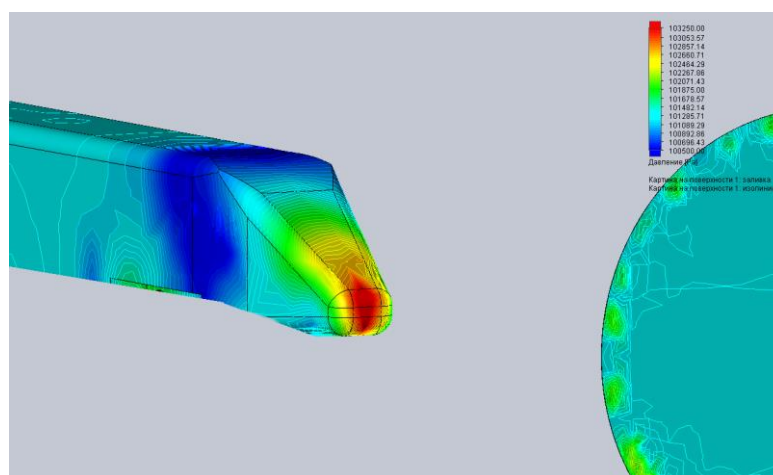


Рисунок 2.2 – Эпюра воздушного давления на носовой поверхности поезда

Нагрузка, определенная на поверхности состава, приложена к самому составу, таким образом, при решении внешней задачи меняется физический процесс генерации волн давления, и воздействие создается движущимся поездом.

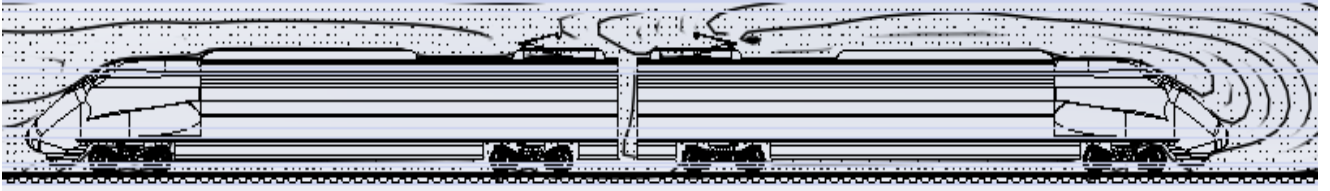


Рисунок 2.3 – Модель высокоскоростного поезда и траектории обтекания потоков

В качестве граничных условий выступают при моделировании поверхности с приложенным к ним нормальным атмосферным давлением окружающей среды 101325 Па (полное давление), направление потока – нормальное.

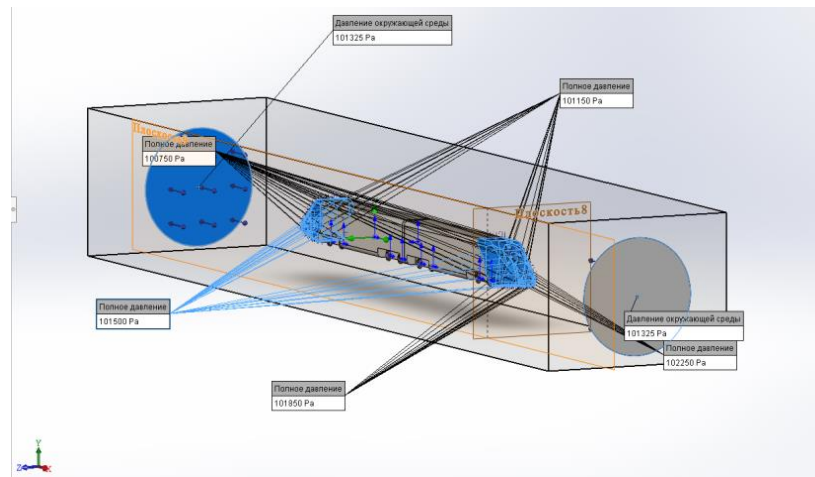


Рисунок 2.4 – Граничные условия решения внешней задачи аэродинамического взаимодействия

Элементы внешней поверхности поезда – wall, сеточные элементы воздушной среды переменные – от 0,01 до 0,5 м с плавным сгущением в подвижной области.

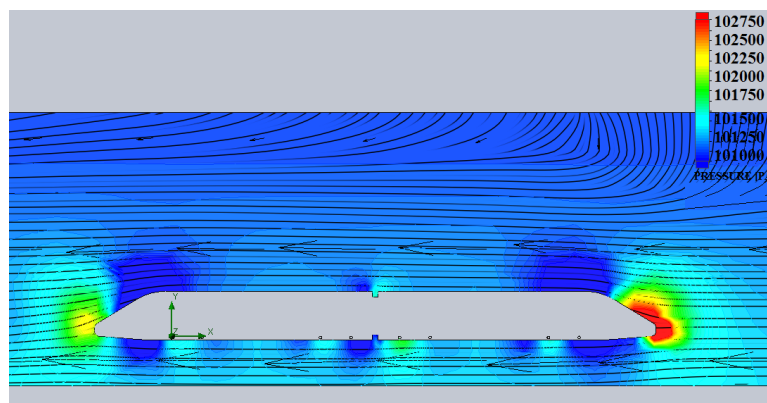


Рисунок 2.5 – Эпюра полного давления в окружающей среде

Полученные при решении задачи значения аэродинамического давления и его распределение при прохождении поезда с заданными скоростями движения на открытом пространстве были валидированы с решениями, полученными другими

исследователями, и нормативными значениями. Принятые в модели допущения позволили получить удовлетворительную точность результатов, откалиброванная и верифицированная модель высокоскоростного подвижного состава может быть обосновано применена к моделированию аэродинамического взаимодействия, возникающего при прохождении поезда в тоннеле на ВСМ.

Обоснование модели тоннеля на ВСМ

Тоннель на ВСМ представляет собой искусственное сооружение высокой ответственности: к его конструкциям предъявляются строгие требования безопасности, прочности, жесткости элементов. Для получения модели, приближенной к реалистичным условиям, необходимо учитывать ранее описанные геометрические, механические и аэродинамические характеристики данного элемента системы «тоннель – воздушная среда – поезд». В соответствии с поставленными задачами исследования, методикой моделирования и обоснованным порядком проведения экспериментов модель тоннеля на ВСМ должна предусматривать возможность параметрического изменения в выбранном диапазоне значений геометрических параметров модели – длины и площади поперечного сечения.

С целью получения реальной картины аэродинамического воздействия на тоннельную обделку при прохождении поезда на ВСМ тоннельное пересечение моделируется с некоторыми допущениями: отсутствие элементов стационарного оборудования – электропроводов, трубопроводов, технологических шкафов, укрытий, тамбур-шлюзов и затворов, элементов освещения и СЦБ, подвески контактного провода, контактного проводом, элементов дренажа и водоотведения в связи с экспериментально подтвержденным незначительным эффектом их влияния на конечный результат моделирования [86, 87, 112], который возможно нивелировать значением шероховатости обделки [122, 154, 158]. Во многих зарубежных исследованиях, в нормативной документации рекомендуется для тоннелей на ВСМ применять гладкую, обтекаемую обделку без резких изменений

сечений с утопленными в тело обделки коммуникациями. Модель тоннеля на ВСМ представлена на рисунке 2.6.

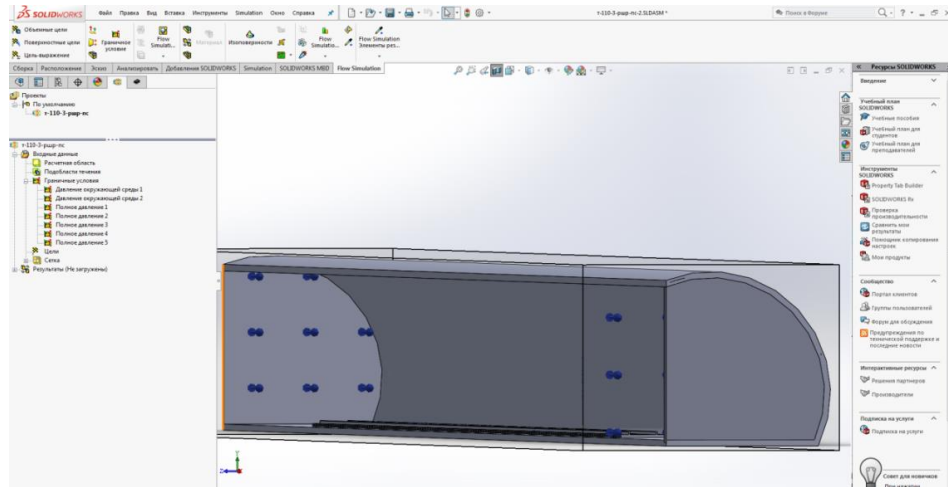


Рисунок 2.6 – Модель тоннеля на ВСМ

Модель представляет собой связанные объемные элементы, обладающие возможностью изменения их геометрических характеристик в пределах, установленных при планировании эксперимента, и сведенных в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры варьирования геометрическими характеристиками модели тоннеля на ВСМ

Параметр варьирования	Диапазон варьирования	Интервал варьирования
Площадь поперечного сечения, м ²	55-110	-1; -0,33; 0; 0,33; 1
Относительная длина сооружения, б/р	1-13	-1; -0,33; 0; 0,33; 1

Однопутный железнодорожный тоннель представлен в виде конструкции кругового очертания, сооружаемой щитовым способом при внутреннем диаметре обделки от 9,0 до 12,5 м. Тоннель моделируется как искусственное сооружение: основание жесткое, безбалластное, внутреннее оборудование и обустройство сведено к минимуму – имитирована утопленность в тело обделки толщиной 450 мм. Обоснованность принятой модели тоннеля на ВСМ подтверждается аналогичными допущениями в работах [78, 80, 108, 117, 154, 158], с учётом последующей успешной верификации полученных при моделировании аэродинамического воздействия результатов. Пример модели с элементами расчетной сетки представлен на рисунке 2.7.

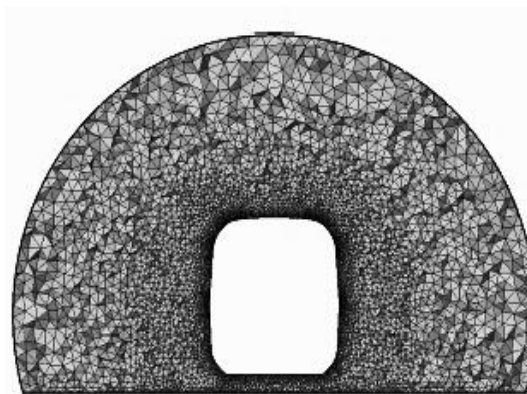


Рисунок 2.7 – Пример модели тоннеля на ВСМ с элементами расчетных сеток воздушной среды

2.4. Исследование взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения

Модель аэродинамического взаимодействия внутри системы «тоннель – воздушная среда – поезд» основана на решении потока реального газа при воздействии твердого тела и его обтекании для нестационарного течения, поставленная задача определяется в модели уравнениями Навье–Стокса, с использованием методов механики сплошной среды.

Областью применения настоящей математической модели являются условия взаимодействия в рамках условной эксплуатируемой ВСМ в особенностях РФ, что обусловлено как скоростным режимом (движение поездов при 160-400 км/ч), так и особенностями свойств окружающей среды, конструкциями тоннеля.

Аэродинамические процессы проявляются в виде волн давления, микродавления, перепадов статического давления, обусловленного переносом энергии, и возникновением скоростного напора – динамического давления, проявляющегося в виде пульсационных воздействий сжатых воздушных масс. Волны сжатия распространяются впереди поезда, когда воздушная пробка движется вперед с высоким давлением, генерируемым поездом в тоннеле. Волна разрежения в хвостовой части несёт в себе турбулентные завихрения, зачастую пульсирующие вдоль тоннеля. Пульсационные воздействия воздушных масс, обладающие скоростью, которая может превышать скорость движущегося в тоннеле поезда, образуют в том числе турбулентные завихрения.

Результаты выполнения практических расчётов для решения задачи прохождения поезда по однопутному тоннелю на ВСМ количественно и качественно характеризуют аэродинамические процессы в системе «тоннель – воздушная среда – поезд». Проверки выполнения критериев безопасности и комфорта в этом случае определены ограничением максимального аэродинамического давления (10 кПа за любой промежуток времени движения поезда в тоннеле).

Расчёт системы «тоннель – воздушная среда – поезд» требует существенных затрат времени при вычислениях, однако это дает возможность приблизить модель к реальным условиям. С помощью результатов расчета возможно оценить аэродинамическое давление, проанализировать эффекты, связанные с перепадами волн давления по длине тоннеля.

С целью исследования аэродинамического взаимодействия многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд» осуществлена серия экспериментов. Исследование включает в себя моделирование прохождения высокоскоростным поездом тоннеля в виртуальной герметичной среде при различных условиях: механических и геометрических параметрах системы – скорости движения поезда v , (км/ч), площади поперечного сечения S_{tun} , (м^2) и длины тоннеля L , (м), приведенной к безразмерному коэффициенту длины λ (отношение длины тоннеля L_{tun} к длине поезда L_{tr}). Были заданы параметры окружающей среды, а именно: температура (T) 293 К, давление (p) 101325 Па, плотность (ρ) 1,204 кг/м³, кинематическая вязкость (ν) $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, динамическая вязкость (η) 18,1 мПа·с. Принята модель SST турбулентности. На модели установлены граничные условия, имитирующие взаимодействие газа с движущимися поверхностями поезда и неподвижными стенками тоннеля.

Число Рейнольдса для разработанных моделей варьируется: например, $1,84 \cdot 10^7$ при скорости 250 км/ч, $2,69 \cdot 10^7$ при скорости 350 км/ч. Число конечных объёмов расчётной области составило от 2,5 млн до 27,2 млн, с плавным сгущением. Размер сеточных элементов воздушной среды переменный – от 0,01 до 0,5 м со сгущением в подвижной области. Задача рассматривалась в нестационарной постановке, шаг по времени составлял 0,001–0,005 с.

2.5. Результаты исследований, определение характера аэродинамического взаимодействия и его особенностей

Для анализа достоверности полученных результатов при моделировании аэродинамического давления, система «тоннель – воздушная среда – поезд» описывается критериями, которые позволяют провести верификацию модели. В исследуемой задаче взаимодействия принимаются допущения, принятые в верифицированной модели высокоскоростного поезда. Дополнительное сопротивление и завихрения от размещенного оборудования в тоннеле могут быть компенсированы повышением шероховатости ($\mu = 10,0 - 100,0$ мкм).

Автоматизированное развитие пограничного слоя у поверхностей за счёт детальной дискретизации сетки и проработки пограничного слоя дает возможность предоставить детальную и точную картину распределения давлений, что оказывает влияние на значения аэродинамических воздействий. Определение пристеночных слоёв позволяет получить корректный градиент давлений, соответственно, достоверные значения аэродинамического давления.

Моделирование аэродинамического взаимодействия системы позволяет оценить изменения давления внутри тоннелей различной площади поперечного сечения и длины во время прохождения в нем высокоскоростного состава с варьируемыми скоростями движения, а также определить геометрические параметры системы, при которых соблюдается уровень ограничения перепадов аэродинамического давления не более 10 кПа в любой точке тоннеля по его длине за любой интервал времени. Диапазонами входных данных для системы «тоннель – воздушная среда – поезд» являются приведенные в таблице 2.3 значения:

Таблица 2.3 – Интервалы варьирования начальными переменными для экспериментов

Величины переменных	Интервалы варьирования				
	-1	-0,33	0	0,33	1
$V, \frac{\text{км/ч}}{\text{м/с}}$	<u>250</u> 69,44	<u>300</u> 83,33	<u>325</u> 90,27	<u>350</u> 97,22	<u>400</u> 111,11
β $S, \text{м}^2$	<u>0,131</u> 110	<u>0,174</u> 82,5	<u>0,196</u> 73,33	<u>0,218</u> 66	<u>0,261</u> 55
λ	1	5	7	9	13

В соответствии с планированием эксперимента установлены необходимые серии моделирования, соответствующие критерию D – оптимального плана. Моделирование производится поэтапно, на порталах тоннеля установлены в виде сочетания открытых граничных условий и стенки, на границах раздела – непрерывность потока (рисунки 2.8, 2.9). Условие фиксированного градиента нормали позволяет возмущениям распространяться через отверстия в виде звуковых волн.

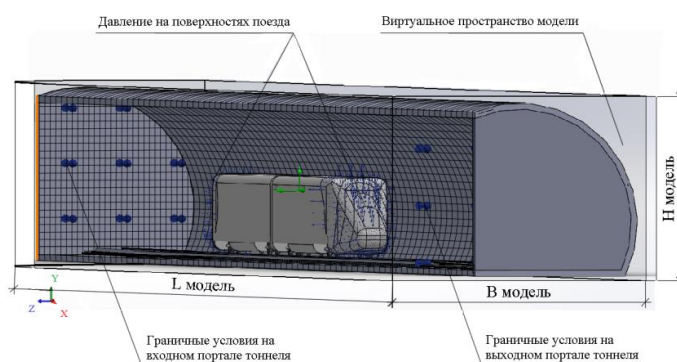


Рисунок 2.8 – Моделирование взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд»: граничные условия

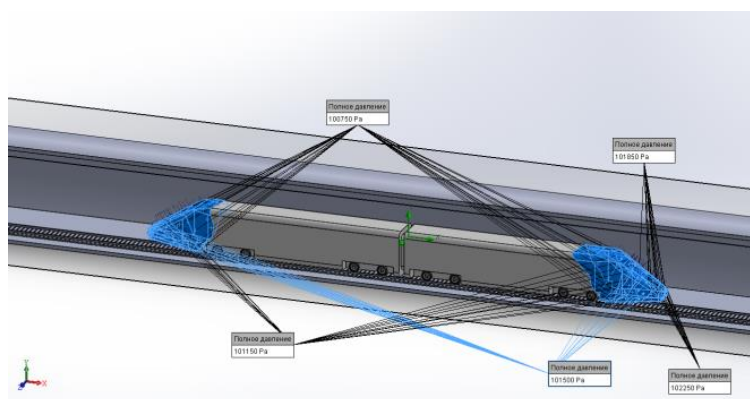


Рисунок 2.9 – Моделирование взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд»: давления на поверхности высокоскоростного поезда

В результате исследований определены характер аэродинамического давления и его численные значения при различных параметрах системы, получены эпюры распределения траекторий потоков, скоростей, давления. На рисунках изображены наиболее характерные для решения задачи аэродинамического взаимодействия системы эпюры распределения давления и скорости потока (рисунки 2.10 – 2.13, 2.16), плотности и давления инерционно увлекаемых воздушных масс (рисунок 2.14), траектории воздушных потоков (рисунки 2.15 – 2.17), возникающих в тоннеле во время прохождения в нём высокоскоростного подвижного состава.

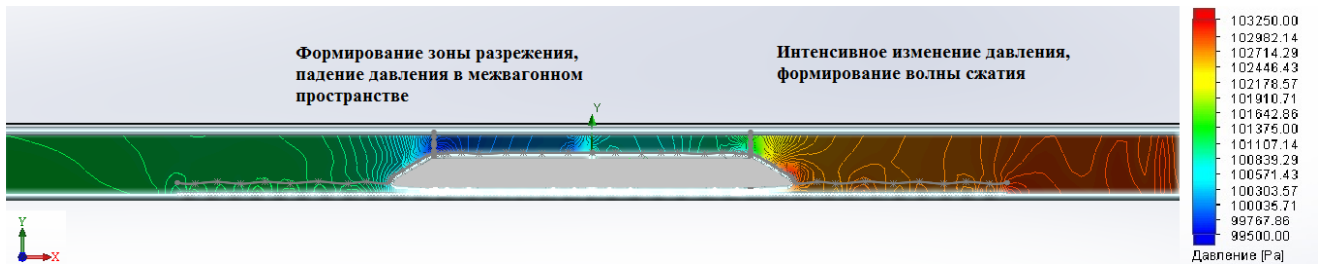


Рисунок 2.10 – Эпюра аэродинамического давления по длине тоннеля при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы «тоннель – воздушная среда – поезд» $\beta=0,156$, $\lambda=5$)

Были определены характерные зоны сжатия и разрежения, а также значения их аэродинамического давления; определены участки наиболее неравномерного проявления давления по длине движущегося поезда и по длине тоннеля; подтверждено наличие сложного поля завихрения в голове и хвосте состава и по длине тоннеля [29, 122].

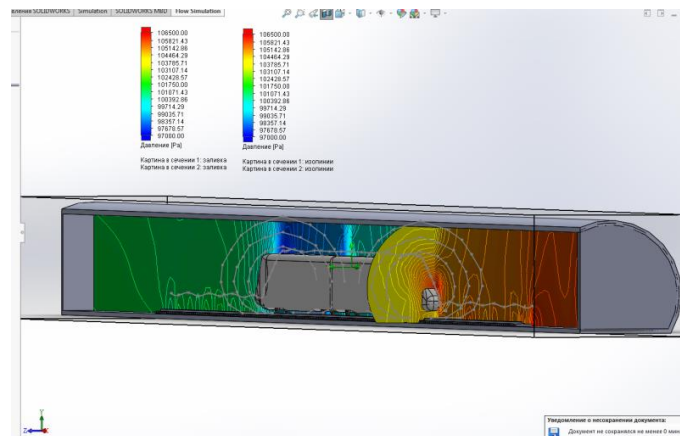


Рисунок 2.11 – Результирующая эпюра давления потока в тоннеле при движении поезда со скоростью 350 км/ч

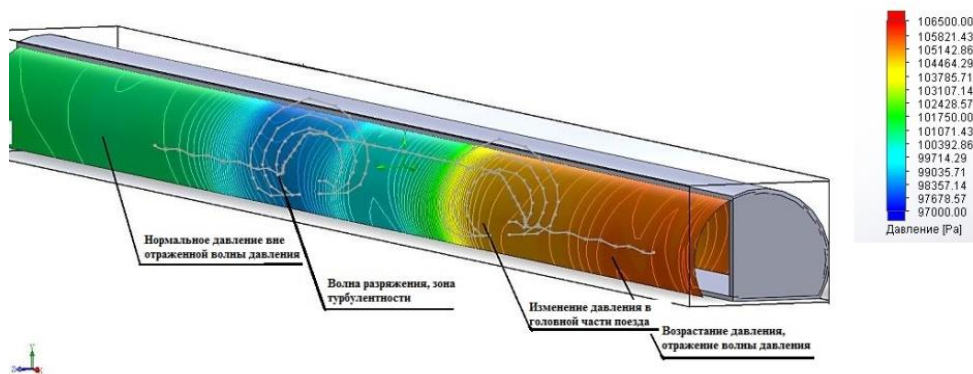


Рисунок 2.12 – Результирующая эпюра давления потока на тоннельную обделку при движении поезда со скоростью 350 км/ч

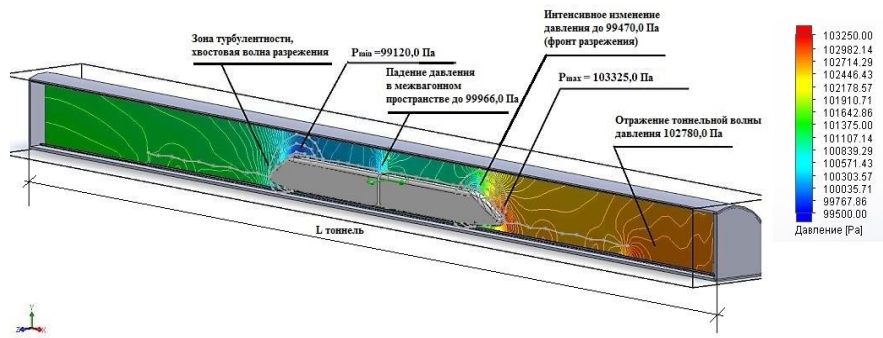


Рисунок 2.13 – Результирующая эпюра давления потока в тоннеле при движении поезда со скоростью 350 км/ч

Методика позволяет проанализировать изменения в увлекаемых воздушных массах: слои воздуха двигаются вместе с подвижным составом. В то же время часть воздушного потока между движущимся поездом и тоннельной обделкой разгоняется, двигаясь из зон сжатия в области разрежения. Воздушные потоки изменяют свою плотность с возникновением разреженных областей, особенно в хвостовой части поезда, формируются турбулентные потоки и течения.

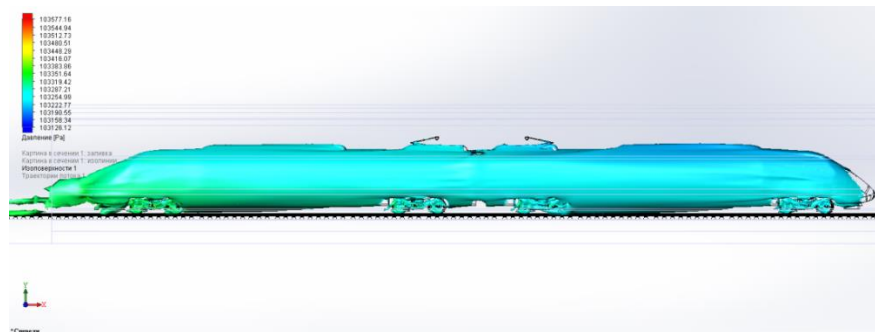


Рисунок 2.14 – Налипание воздушного потока на движущийся в тоннеле подвижной состав

Полученные данные позволяют определить траектории воздушных потоков в различные моменты времени, что особенно эффективно при прогнозе пульсационных явлений, а также для установления изменений направлений потоков и траекторий, вызванных силами вязкого трения при высоких скоростях движения поездов.

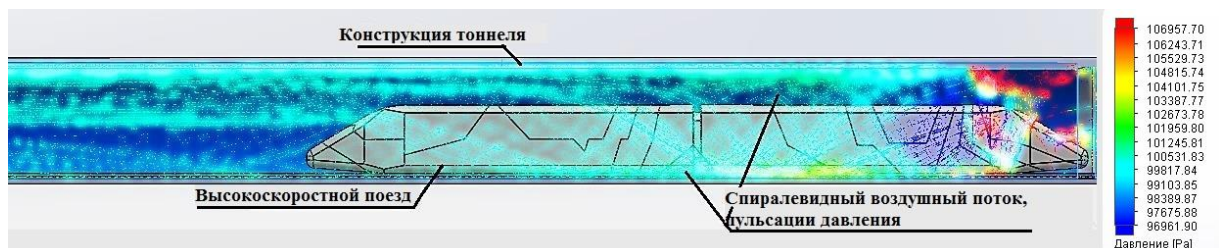


Рисунок 2.15 – Завихрение воздушного потока, создающее пульсации давления

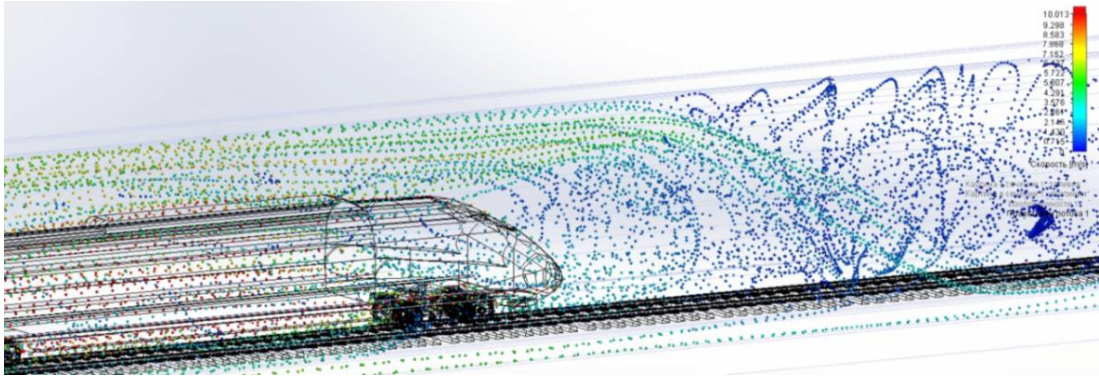


Рисунок 2.16 – Траектории воздушных потоков при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы $\beta=0,225$, $\lambda=3$)

Движение поезда внутри тоннеля сопровождаются проявлениями спиралевидных завихрений, создающих динамические пульсации: при этом они начинают генерироваться ещё до момента интерференции тоннельных волн с волнами, отраженными от порталов.

Характерная спиралевидная форма перемещения воздушных масс – следствие сохранения импульса (напряжения пропорциональны скорости деформации в рассматриваемом объеме). Спиралевидное формирование воздушных потоков устойчиво, способно поддерживать баланс внутренней энергии, может взаимодействовать с другими объёмами и не разделяется.

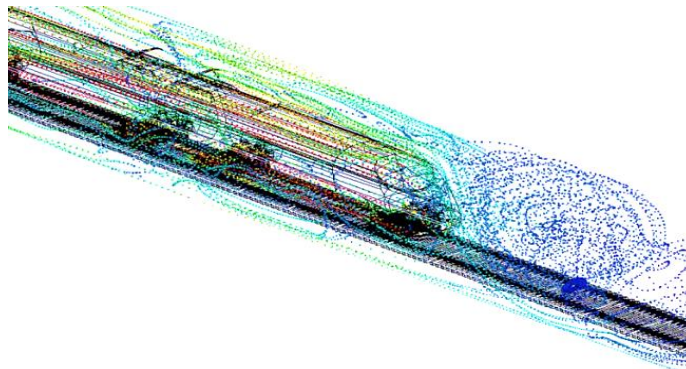


Рисунок 2.17 – Траектории турбулентных потоков в хвостовой части поезда (при параметрах системы $\beta = 0,197$; $\lambda = 5$; $v=250$ км/ч)

Спиралевидные воздушные массы практически не взаимосвязаны, формирование пограничных слоев на поверхностях обуславливает нулевую скорость воздушного потока относительно скорости поверхности. Взаимодействие двух противоположно направленных масс является вязким, что создает условие для образования вращательных движений воздуха.

Результаты исследований, проведенных по разработанной методике математического моделирования аэродинамических процессов, подтверждают установленные гипотезы: воздушные массы увлекаются из зоны сжатия в зону разрежения, образуя турбулентные потоки меньшей плотности; колебания давления на поверхности обделки тоннеля носят выраженный динамический характер (рисунок 2.18). Определены зоны возникновения наиболее значительных амплитуд аэродинамического давления [20,29].

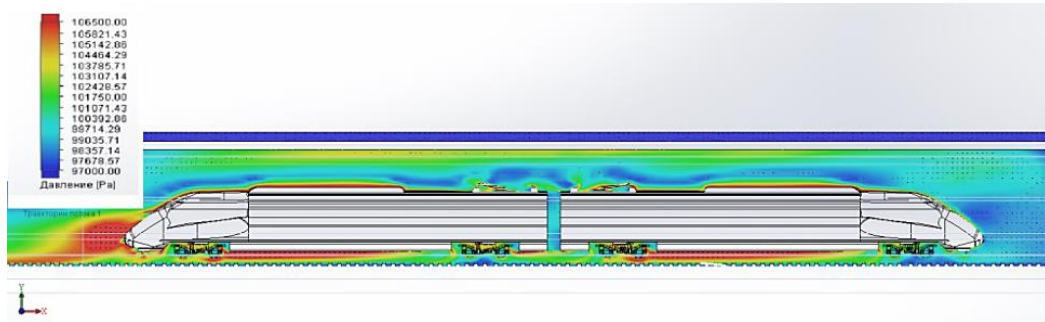


Рисунок 2.18 – Эпюра аэродинамического давления при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы $\beta=0,225$, $\lambda=3$)

Температура внутри тоннеля возрастает при росте давления (рисунок 2.19), однако изменения менее значительны, чем изменения давления: изменение температуры в пределах 15-20 градусов, как правило, при эксплуатации может быть компенсировано работой систем тоннельной вентиляции [34, 44, 138].

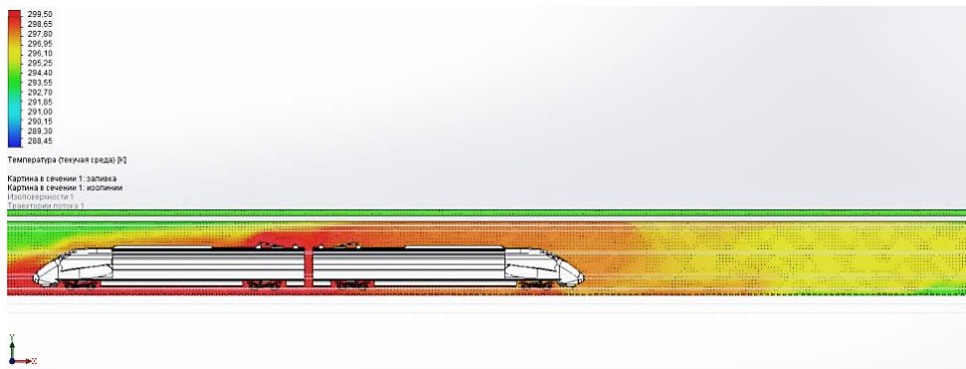


Рисунок 2.19 – Эпюра распределения температуры в тоннеле при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы $\beta=0,225$, $\lambda=3$)

Конкретные положения пиковых значений положительного давления и отрицательного давления могут быть получены путем анализа колебаний давления в тоннеле при различных скоростях движения поезда, длинах тоннеля и поезда, площадях поперечного сечения тоннеля и поезда.

В результате проведенного математического моделирования установлены максимальные и минимальные значения аэродинамического давления, зависимости от различных исходных данных и параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд». Доступность построения объемных эпюр давления, скоростей, плотностей потоков, а также их траекторий определила высокую степень глубины исследования темы: стало возможным детально рассмотреть процессы и исследовать эффекты, которыми ранее могли пренебречь.

Корректно принятые входные параметры полноценно позволили оценить аэродинамические воздействия: выявлены особенности формирования волн давления, отражение волн от входного и выходного порталов, подтверждена их физическая природа. Применение относительных значений площадей поперечного сечения и длин исследуемых объектов также позволили эффективно оценить степень изменения аэродинамического воздействия. Аэродинамические параметры окружающей среды и особенности выбранной модели турбулентности показали прямую взаимосвязь с величинами аэродинамических воздействий, подтверждены аэродинамические концепции влияния основных значимых параметров. Определены величины аэродинамических воздействий в тех диапазонах параметров, где прежде исследования не проводились. Исследования, проведенные для верификации результатов, в рамках планирования эксперимента, показали свою воспроизводимость и могут быть рекомендованы для решения подобных задач [20, 122].

Аэродинамические воздействия оказались во многом зависимы от относительных геометрических параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд», что подтверждает гипотезу о существенном влиянии процессов отражения волн давления от входного и выходного порталов. Механические параметры системы, обуславливающие значения сопротивления воздуха и сопротивления распространению воздушных волн по тоннелю, определяют степень влияния отражающихся волн и их скорости распространения в противоположную сторону, в целом оказывая воздействие на значения амплитуды статического давления. Аэродинамические параметры окружающей среды и

особенности температурно-влажностного режима тоннелей на ВСМ определили особенности распределения давления и импульса давления, вязкостные свойства реального газа оказали существенное влияние на величины и распространение волн сжатия и разрежения.

2.6. Сравнительный анализ и верификация результатов моделирования с экспериментальными данными зарубежных исследователей

Анализ результатов исследования включает в себя верификацию с решениями, полученными другими исследователями, и нормативными значениями. Для проверки принятой модели, её калибровки были проведены исследования с начальными данными, соответствующими начальным данным решений определенных задач аэродинамического взаимодействия с высокоскоростным поездом (таблица 2.4). Такой подход позволяет на начальных этапах моделирования отладить модель многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд» во избежание дальнейших ошибок: они могут привести к значительным временным затратам.

Таблица 2.4 – Сравнение результатов, полученных при моделировании прохождения поездом тоннеля на ВСМ

Измеряемый параметр	Методы решения		
	Решение 1 [158]	Решение 2 [139]	Метод
Амплитуда статического давления, Па	2820/100%	2601/-7,8%	2935/+4,1%
Пиковое давление, Па	6710/100%	6922/+3,2%	6415/-4,4%

Верификация выполнена для результатов моделирования с данными, полученными по итогам научного сопровождения при эксплуатации однопутных тоннелей на ВСМ. Информация из материалов мониторинга, опубликованная в работах, посвященных опыту эксплуатации однопутных тоннелей в КНР, Японии и странах Европы [82, 139, 146, 158]: натурные измерения осуществлены с помощью высокочастотных датчиков, фиксирующих изменения давления, установленных на обделке тоннеля, либо на поверхности поезда.

В таблицах 2.5 – 2.8 приводится сравнение результатов решений задач аэродинамического взаимодействия с результатами исследований [80, 98, 99, 105, 117, 123, 130, 151, 158] («метод» соответствует описываемым в работе результатам моделирования). Общепринято применение международных норм UIC для оценки соответствия критериям безопасности [78, 80, 97, 105, 154]. Показана достоверность качественной картины явлений и количественная сходимость, что доказывает правомерность применения разработанной методики для исследования аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

Таблица 2.5 – Сравнение результатов моделирования аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при скорости 250 км/ч

V=250 км/ч	Амплитуда давления, Па		
	$\beta=0,2; \lambda=3$	$\beta=0,175; \lambda=5$	$\beta=0,2; \lambda=10$
UIC 779-11	4125,0/ 100%	3375,0/ 100%	3250,0/ 100%
Решение 1 [98]	3980,5/ -3,5%		
Решение 2 [158]		3478,0/ +3,0% ($\lambda=4,72$)	
Натурные [105]	4189,3/ +1,5%		3494,5/ +7,5%
Метод	4083,9/ -1,0%	3297,5/ -2,3%	3142,2/ -3,3%

На рисунке 2.20 представлена зависимость давления от времени при прохождении поезда с постоянными коэффициентами блокирования и длины в фиксированной точке тоннеля [105]. Результат представляет собой сравнение перепадов давления при скорости движения поезда 250 км/ч.

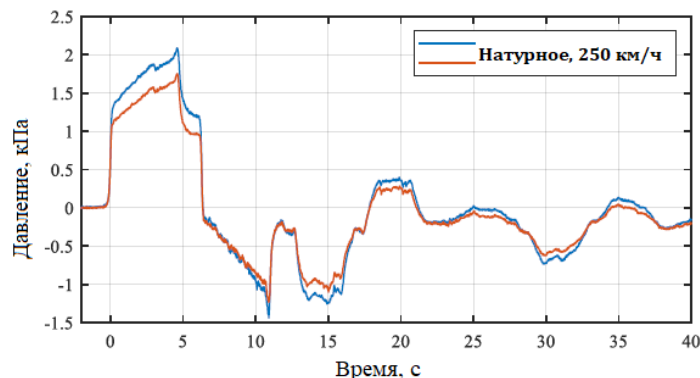


Рисунок 2.20 – График зависимости давления от времени при прохождении поезда в тоннеле на скорости 250 км/ч

Таблица 2.6 – Сравнение результатов моделирования аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при скорости 300 км/ч

V=300 км/ч	Амплитуда давления, Па	
	$\beta=0,125; \lambda=3$	$\beta=0,125; \lambda=5$
UIC 779-11	3635,0/ 100%	3385,0/ 100%
Решение 3 [123]		3260,0/ -3,7%
Решение 4 [130]	3790,9/ +4,3%	
Натурные	3426,7/ -5,7% [80]	3194,6/ -5,6% [105]
Метод	3544,0/ -2,5%	3279,2/ -3,1%

Таблица 2.7 – Сравнение результатов моделирования аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при скорости 350 км/ч

V=350 км/ч	Амплитуда давления, Па		
	$\beta=0,125; \lambda=3$	$\beta=0,125; \lambda=5$	$\beta=0,175; \lambda=5$
UIC 779-11	4830,0/ 100%	4435,0/ 100%	6570,0/ 100%
Решение 5 [151]		4577,4/ +3,2%	
Решение 6 [158]			6710,0/ +2,1% ($\lambda=4,72$)
Натурные	5041,0/ +4,4% [80]	4449,0/ +0,3% [99]	
Метод	4734,4/ -2,0%	4355,1/ -1,8%	6796,7/ +3,5%

Таблица 2.8 – Сравнение результатов моделирования аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при скорости 400 км/ч

V=400 км/ч	Амплитуда давления, Па		
	$\beta=0,155; \lambda=6,5$	$\beta=0,15; \lambda=3$	$\beta=0,2; \lambda=10$
Решение 7 [117]		9705,4/ 100%	
Решение 8 [123]			9292,2/ 100%
Натурное [80]	7592,0 / 100%		
Метод	7184,2/ -5,4%	9274,3/ -4,5%	8930,2/ -3,9%

Сходимость количественных параметров физических явлений была показана графической интерпретацией результатов: сравнение величин значений давления показало удовлетворительную сходимость до 89%, что считается приемлемым в области аэродинамических исследований. Таким образом,

определена адекватность модели и многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

При верификации с основными данными нормативных документов (рисунки 2.21, 2.22) и зарубежными исследованиями в известном моделируемом диапазоне сходимость составила приблизительно 90%, что при указанных условиях эксперимента следует считать удовлетворительным.

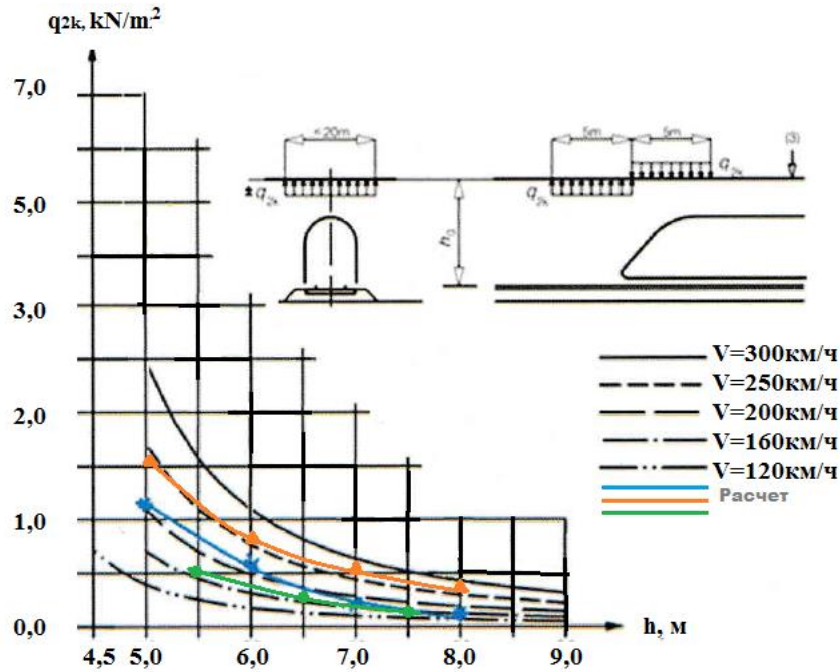


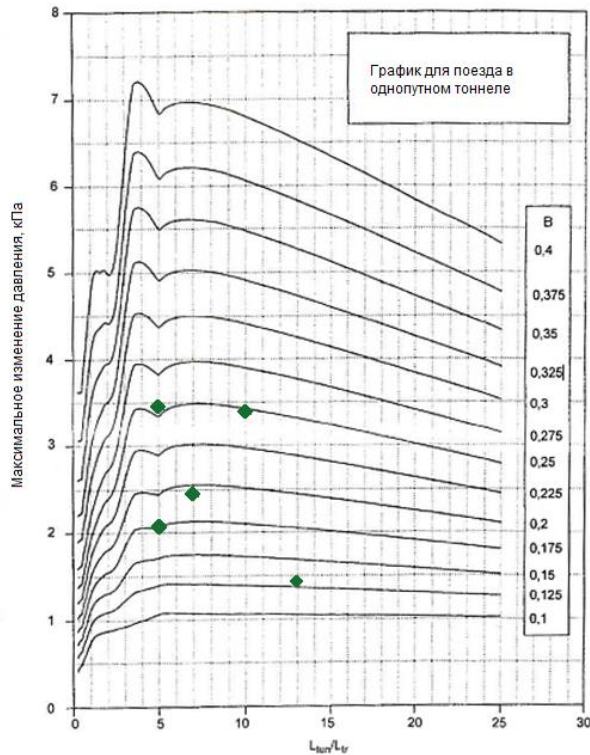
Рисунок 2.21 – График сравнения нормативных и расчетных значений давления (для значений давления при скорости поезда 120 – 300 км/ч)

Результаты моделирования аэродинамического давления были сопоставлены с нормативными данными, приведенными в [61], при скорости движения поезда 160, 200 и 250 км/ч. Зависимости распространения аэродинамического давления сопоставлялись для вертикальной проекции: действие волн давления от движущегося поезда по направлению вверх.

Сходимость расчетных данных с нормативными составила порядка 89–90%. С учетом допущения, что при удовлетворительной сходимости результатов считается, что модель адекватна реальному объекту, возможно проводить исследования с допускаемой погрешностью в диапазоне скоростей от 160 км/ч включительно.

На графиках (рисунок 2.22) представлена верификация с рекомендациями УИС в условиях движения поезда в однопутном тоннеле со скоростью 180 км/ч и 350 км/ч. При этом представленное сравнение осуществлено по максимальным перепадам аэродинамического давления из представленных в УИС (перепады в течение 10 секунд). Сходимость величин составила в среднем от 89% до 95–96 %.

а)



б)

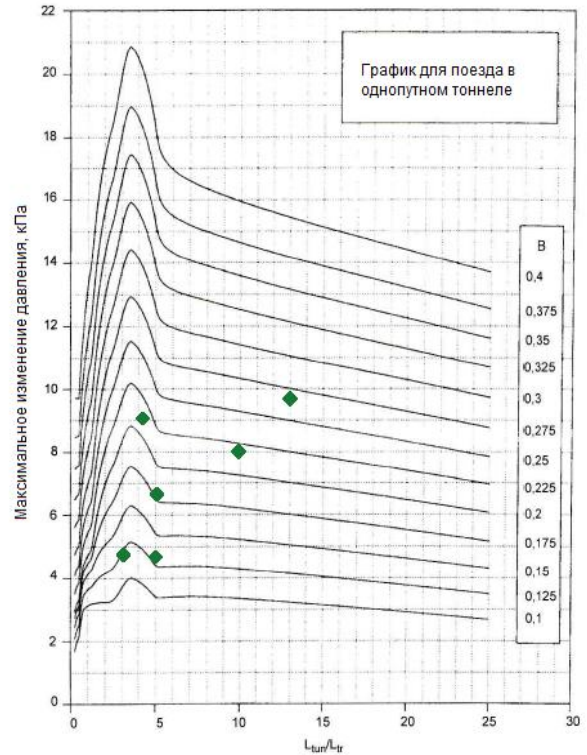


Рисунок 2.22 – График сравнения нормативных и расчетных значений давления (для значений давления при скорости поезда: а) 180 км/ч; б) 350 км/ч)

Известные решения позволяют учесть различные параметры, но их систематизация отсутствует, что не позволяет проследить их действительное влияние на значения аэродинамического воздействия. При этом сохраняется только характер основного взаимодействия, но лишь приближенно. Сравнение решений демонстрирует сходимость результатов, однако математическое моделирование многофакторной системы «тоннель – воздушная среда – поезд» позволило всесторонне рассмотреть работу системы и взаимодействие компонентов внутри нее.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Разработаны и верифицированы модели высокоскоростного подвижного состава и однопутного тоннеля кругового очертания и математическая модель их взаимодействия: применяемые элементы системы «тоннель – воздушная среда – поезд» обоснованы и дифференцированы.

Проведено численное моделирование аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» при различных скоростях поезда, поперечных сечениях и длинах тоннеля, а также аэродинамических параметрах среды. Это позволило получить необходимые данные для дальнейшей разработки методики расчёта аэродинамического давления в системе в условиях скоростного и высокоскоростного движения на основе системного подхода.

Результаты расчетов аэродинамического давления были верифицированы с экспериментальными данными зарубежных исследований – разница между расчетными и фактическими значениями составила в среднем до 89%, что считается удовлетворительным в исследованиях аэродинамических процессов. Результаты проведенных исследований позволили уточнить методику определения аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд».

Выполненные расчеты подтвердили правомерность применения МКО и предложенной методики моделирования к решению задач аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в пределах скоростей движения 250-400 км/ч. До проведения исследований учет различных параметров системы был возможен только с применением МКО и эмпирических данных. Область применения методики может быть распространена на скорости 200 км/ч и менее (в интервале скоростного движения поездов 120-160 км/ч) ввиду удовлетворительной сходимости результатов моделирования с нормативными значениями аэродинамического давления при скорости движения поезда 160, 180 и 200 км/ч.

3 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ТОННЕЛЬ – ВОЗДУШНАЯ СРЕДА – ПОЕЗД»

3.1. Полный факторный эксперимент и математическая модель

В соответствии с теорией планирования эксперимента исследования осуществлялись по плану полного факторного эксперимента (ПФЭ). Для ПФЭ при исследовании сочетаний факторов важно определить количество различных опытов. Это возможно определить возведением числа уровней факторов (если оно для всех факторов одинаково) в степень числа факторов k :

$$N = p^k, \quad (3.1)$$

где p – число уровней.

Например, при пяти уровнях варьирования трёх факторов необходимо 125 опытов (но не менее $4^3=64$ для построения полинома третьей степени).

Если объектом исследования является физический объект или процесс, то эту зависимость выражают уравнением, в общем виде:

$$y = f(x_1 \dots x_k), \quad (3.2)$$

где y – функция отклика; x_1, \dots, x_k – факторы исследуемого процесса.

В случае проведения исследований аэродинамических процессов при прохождении поездов в однопутных железнодорожных тоннелях на ВСМ выходными параметрами являются аэродинамические характеристики воздушной среды, а именно перепады аэродинамического давления. Основными влияющими факторами (входными параметрами) приняты: скорость движения поезда в тоннеле, коэффициент блокирования и коэффициент длины, отражающие геометрические параметры тоннеля и поезда.

Уменьшение числа экспериментов и расчетов является важной сопутствующей задачей, так как их оптимизация способствует экономии ресурсов. D – оптимальный план позволяет снизить число экспериментов, сохраняя при этом необходимую точность оценки модели.

В качестве метода планирования эксперимента принят D – оптимальный план, который относится к группе критериев, связанных с точностью оценивания

параметров модели. План ε называется D – оптимальным, если:

$$\varepsilon = \mathit{Arg} \max_{\varepsilon} |M(\varepsilon)|$$

или

$$\varepsilon = \mathit{Arg} \min_{\varepsilon} |D(\varepsilon)|,$$

где $M(\varepsilon)$ – информационная матрица плана;

$D(\varepsilon)$ – дисперсионная матрица плана.

Эллипсоид рассеивания оценок параметров для D – оптимального плана имеет минимальный объем, стремится к минимизации.

Для решения значительной категории задач критерий D – оптимальности дает удовлетворительные результаты, позволяет получать планы с достаточно точными (при доверительной вероятности 0,95) характеристиками. D – оптимальному плану соответствует наибольший на множестве планов определитель информационной матрицы [10].

Точность результатов численного моделирования связана с математическими моделями и характеристиками системы «тоннель – воздушная среда – поезд», применяемыми при вычислениях. Из параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд», влияющих на аэродинамические процессы, важно выделить факторы, имеющие определяющее значение. В таблице 3.1 приведены выходные параметры задачи.

Таблица 3.1 – Входные параметры задачи

Входные параметры	Базовые значения	Граничные условия	
		Нижняя граница	Верхняя граница
Скорость движения поезда, $\frac{\text{км/ч}}{\text{м/с}}$	$\frac{325}{90,27}$	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{400}{111,11}$
<u>Коэффициент блокирования</u>	$\frac{0,196}{73,33}$	$\frac{0,131}{110}$	$\frac{0,261}{55}$
Площадь поперечного сечения тоннеля, м^2			
Коэффициент длины	7	1	13

При определении математической модели назначение физико-механических характеристик системы «тоннель – воздушная среда – поезд» и их значения могут существенно влиять на результат расчета. В таблице 3.2 приведены уровни варьирования параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

Таблица 3.2 – Уровни варьирования переменных величин системы «тоннель – воздушная среда – поезд»

Величины переменных	Интервалы варьирования				
	-1	-0,33	0	0,33	1
$V, \frac{\text{км/ч}}{\text{м/с}}$	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{300}{83,33}$	$\frac{325}{90,27}$	$\frac{350}{97,22}$	$\frac{400}{111,11}$
$\frac{\beta}{S, \text{м}^2}$	$\frac{0,131}{110}$	$\frac{0,174}{82,5}$	$\frac{0,196}{73,33}$	$\frac{0,218}{66}$	$\frac{0,261}{55}$
λ	1	5	7	9	13

В таблице планирования эксперимента 3.3 сведены исходные данные экспериментальных исследований, на основании которых по результатам моделирования приведены графические зависимости, подтверждающие основные физические концепции на основе системного подхода к оценке взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд».

Таблица 3.3 – Начальные данные переменных для экспериментов

№ эксперимента	Величины переменных					
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
	$V, \frac{\text{км/ч}}{\text{м/с}}$	$\frac{\beta}{S, \text{м}^2}$	λ	$V, \frac{\text{км/ч}}{\text{м/с}}$	$\frac{\beta}{S, \text{м}^2}$	λ
1	1	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{400}{111,11}$	$\frac{0,261}{55}$	9
2	1	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{400}{111,11}$	$\frac{0,218}{66}$	13
3	-1	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,174}{82,5}$	5
4	1	1	-1	$\frac{400}{111,11}$	$\frac{0,261}{55}$	1
5	-1	-1	1	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,131}{110}$	13
6	-1	1	-1	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,261}{55}$	1
7	1	-1	1	$\frac{400}{111,11}$	$\frac{0,131}{110}$	13
8	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,218}{66}$	9
9	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	-1	$\frac{300}{83,33}$	$\frac{0,174}{82,5}$	1
10	1	-1	-1	$\frac{400}{111,11}$	$\frac{0,131}{110}$	1
11	-1	1	1	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,261}{55}$	13
12	-1	-1	-1	$\frac{250}{69,44}$	$\frac{0,131}{110}$	1
13	$-\frac{1}{3}$	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{300}{83,33}$	$\frac{0,261}{55}$	5
14	$\frac{1}{3}$	-1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{350}{97,22}$	$\frac{0,131}{110}$	5

Таким образом, математическая модель задачи определения аэродинамического давления при прохождении поездов в однопутных железнодорожных тоннелях на ВСМ представляет собой выражение:

$$\Delta p = f(V, \beta, \lambda). \quad (3.4)$$

3.2. Регрессионный анализ результатов исследования

Анализ результатов моделирования взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд», установление полнофакторных зависимостей позволит прогнозировать поведение системы при вариации переменных и применить результаты практически к оценке аэродинамического давления в тоннелях на ВСМ.

Результаты моделирования обработаны с помощью методов полиномиальной нелинейной регрессии, что позволяет установить зависимости между входными и выходными параметрами. Математическое описание зависимости между выходными и входными параметрами может быть представлено полиномиальной функцией:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \dots, \quad (3.5)$$

где b_i – числовые коэффициенты;

y – функция отклика;

x_i, \dots, x_k – факторы исследуемого процесса.

В случае проведения трехфакторного исследования (влияющие факторы: скорость движения поезда, коэффициент блокирования и коэффициент длины) аэродинамических процессов при прохождении поездов в однопутных железнодорожных тоннелях на ВСМ выходными параметрами являются аэродинамические характеристики воздушной среды, функция представляет собой трехстепенной полином:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1^2 + b_8 X_2^2 + b_9 X_3^2 + b_{10} X_1 X_2 X_3 + b_{11} X_1^3 + b_{12} X_2^3 + b_{13} X_3^3. \quad (3.6)$$

Для оценки результатов экспериментов и результатов регрессионного анализа используются различные критерии, в соответствии с решением поставленных в исследовании задач.

При контроле воспроизводимости результатов исследования необходимо вычислить отношение максимального значения дисперсии среди всей серии опытов к сумме изменчивостей во всех опытах. Наибольшее значение параметра сравнивают с критическим значением, при котором гипотезу о воспроизводимости эксперимента возможно считать справедливой. Таким образом, подтверждается возможность использовать результаты для оценки коэффициентов регрессии.

При проверке адекватности модели необходимо сравнить дисперсию ошибок прогноза модели и дисперсию погрешностей измерений. Если дисперсия адекватности больше дисперсии воспроизводимости, то ошибки модели не могут быть объяснены погрешностями измерений, на основе которых она построена. Модель считается адекватной при условии, что оценка дисперсии воспроизводимости больше либо равна оценке дисперсии адекватности, либо при незначительном различии их дисперсий. Проверку гипотезы о равенстве дисперсий осуществляют по критерию Фишера (отношение большей дисперсии адекватности к меньшей дисперсии воспроизводимости). Критические значения критерия зависят от числа степеней свободы дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости. В насыщенных планах невозможно вычислить дисперсию адекватности модели.

Фактор инфляции дисперсии (VIF – variance inflation factor) отражает корреляцию между переменными-предикторами в регрессионной модели:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (3.7)$$

$$R_j^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (3.8)$$

где R_j^2 – коэффициент детерминации j -го признака относительно остальных.

Равенство единице фактора инфляции дисперсии говорит об ортогональности вектора значений признака остальным. Если значение VIF_j велико, то $(1 - R_j^2)$ – мало, то есть R_j^2 близко к 1. Большие значения фактора инфляции дисперсии соответствуют почти линейной зависимости j -го столбца от остальных [67].

При мультиколлинеарности возможно выполнить анализ, предназначенный для учета переменных с высокой степенью корреляции (анализ основных компонент, частичная регрессия методом наименьших квадратов). Также применима оценка наименьших квадратов параметров с помощью итерационных процедур, осуществляющих последовательное приближение к минимуму суммы квадратов (методы нелинейной оптимизации Ньютона–Рафсона, Нелдера–Мидда, метод сопряженных градиентов).

При вариации входных параметров в результате расчетов, выполненных с использованием МКО в программных комплексах, были определены сведения об аэродинамическом состоянии системы «тоннель – воздушная среда – поезд», значения аэродинамического давления и затем сведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Таблица планирования экспериментов

№	X ₁		X ₂		X ₃	Y ₁
	V _{tr} , км/ч	V _{tr} , м/с	S _{тин} , м ²	β	λ	Δp _{max} , Па
1	400	111,11	55	0,26127	9	12207,180
2	400	111,11	66	0,21773	13	9706,640
3	250	69,44	82,5	0,17418	5	3254,470
4	400	111,11	55	0,26127	1	8339,000
5	250	69,44	110	0,13064	13	2161,349
6	250	69,44	55	0,26127	1	3051,702
7	400	111,11	110	0,13064	13	5546,670
8	250	69,44	66	0,21773	9	4150,074
9	300	83,33	82,5	0,17418	1	3086,726
10	400	111,11	110	0,13064	1	4570,600
11	250	69,44	55	0,26127	13	4930,937
12	250	69,44	110	0,13064	1	1432,756
13	300	83,33	55	0,26127	5	7787,528
14	350	97,22	110	0,13064	5	4569,949

Коэффициенты регрессии и уравнения определялись в приложении MathCad с помощью программ планирования эксперимента. Матрицы D и E представляют собой исходные данные для проведения регрессионного анализа (рисунок 3.1).

3.3. Оценка степени влияния начальных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на характер и величину её аэродинамического взаимодействия

Оценка степени влияния различных входных параметров объекта исследования на выходные данные представляет собой один из методов расчетно-теоретического анализа. Система включает в себя параметр P и его k факторы, они определены как $P = f(x_1, \dots, x_k)$. Изучена степень влияния на параметры P при изменении факторов x_i в интервале возможных значений, отличных от основного положения $P^* = f(x_1^*, \dots, x_k^*)$.

С целью выполнения оценки степени влияния различных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на перепады аэродинамического давления входные и выходные параметры сведены к безразмерным величинам. Выполнение осуществляется с использованием выражения:

$$S_i = \left| \frac{\Delta P}{P} \right| / \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right| = \left| \frac{\Delta P}{\Delta x_i} \right| \left| \frac{x_i}{P} \right|, \quad (3.9)$$

где S_i – степень влияния фактора x_i , $i=1, 2, 3, \dots, k$;

$|\Delta P/P|$ и $|\Delta x_i/x_i|$ – отношения отклонений выходного и входного параметров к их базовому значению. При малых значениях $|\Delta x_i/x_i|$ формула (3.9) может быть аппроксимирована как:

$$S_i = \left| \frac{dP}{dx_i} \right| \left| \frac{x_i}{P} \right|; i = 1, 2, \dots, k. \quad (3.10)$$

Согласно (3.10) выявлена степень влияния каждого из входных параметров задачи x_i на величину искомых выходных параметров P .

Незначительное изменение входного параметра x_i способно повлиять на существенное изменение выходного параметра P (например, перепад аэродинамического давления), тогда x_i считается «высокочувствительным параметром» для P , и напротив, незначительное изменение P в ответ на изменение x_i , означает, что x_i считается «низкочувствительным параметром». «Чувствительность» аэродинамического давления в вышеупомянутой системе «тоннель – воздушная среда – поезд» при изменении её параметров (скорость

движения поезда, механические и геометрические характеристики) будет обусловлена результатами расчетов.

Влияние параметров на характер и величину аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» может быть представлено в виде выражений. Для примера Δp_{max} :

$$\begin{cases} 1,2522v_{tr}^2 + 1,3753v_{tr} = \Delta p_{max}, R^2 = 0,9982 \\ 19522\beta^2 + 55808\beta - 1260,7 = \Delta p_{max}, R^2 = 0,9995 \\ 0,591\lambda^5 - 26,787\lambda^4 + 455,45\lambda^3 - 3558,4\lambda^2 + 12184\lambda + 448,6 = \Delta p_{max}, R^2 = 0,9732 \end{cases} \quad (3.11)$$

Величина доверительной аппроксимации R^2 выше 85% означает достаточную точность функции, выше 95% – точность функции. Данные зависимости приведены для максимальных значений перепадов аэродинамического давления в тоннеле с учетом изменения одного из трех факторов, влияющих на конечное значение функции (рисунки 3.3–3.5).

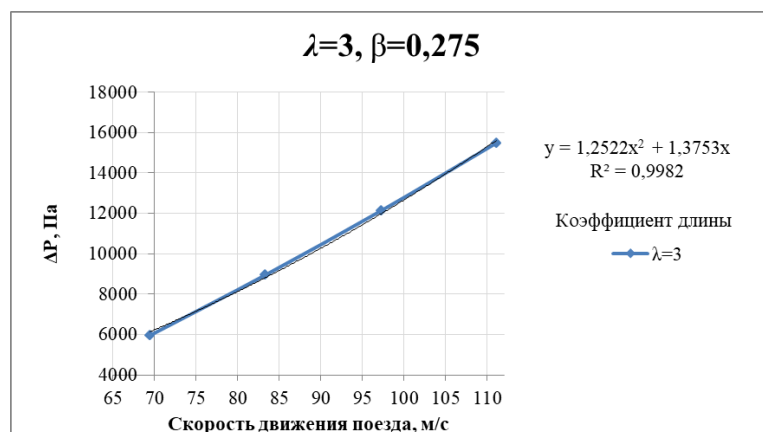


Рисунок 3.3 – Зависимость между входными и выходными параметрами задачи при фиксированных коэффициентах длины и блокирования

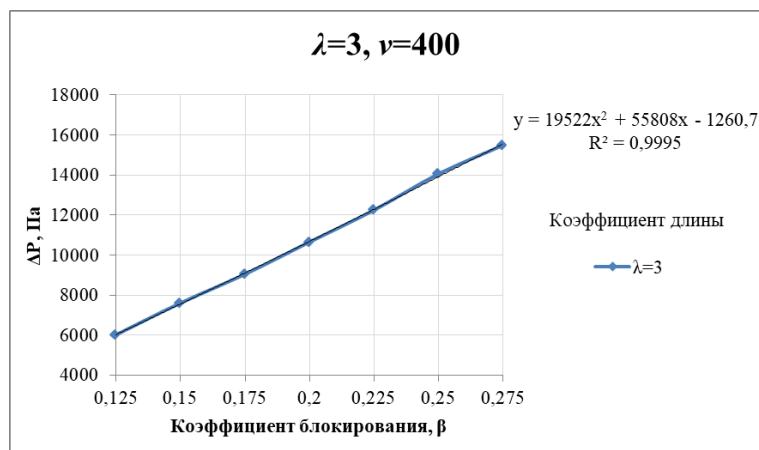


Рисунок 3.4 – Зависимость между входными и выходными параметрами задачи при фиксированных коэффициенте длины и скорости движения поезда

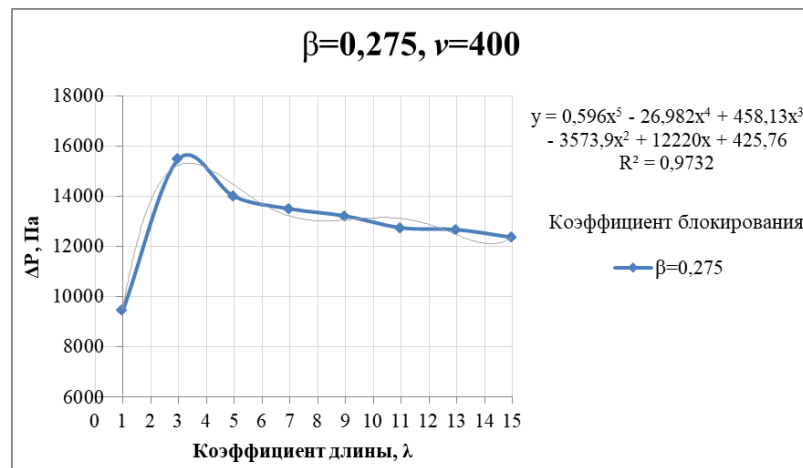


Рисунок 3.5 – Зависимость между входными и выходными параметрами задачи при фиксированных коэффициенте блокирования и скорости движения поезда

Степень влияния входных параметров на выходные представлена в графическом виде на рисунках 3.6 – 3.8.

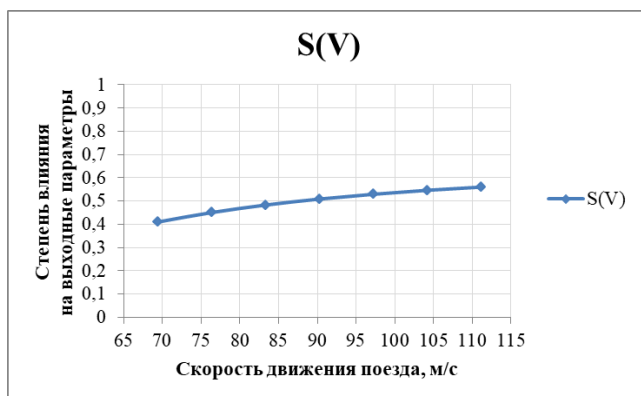


Рисунок 3.6 – Степень влияния скорости движения поезда на максимальный перепад



Рисунок 3.7 – Степень влияния коэффициента блокирования на максимальный перепад

аэродинамического давления в тоннеле аэродинамического давления в тоннеле



Рисунок 3.8 – Степень влияния коэффициента длины на максимальный перепад аэродинамического давления в тоннеле

В частности, в однопутных железнодорожных тоннелях на ВСМ при заданной скорости движения поезда и принятых геометрических параметрах тоннеля и поезда установлено:

- наибольшее влияние на величину максимальных перепадов аэродинамического давления в тоннеле в интервале расчетных величин оказывает коэффициент блокирования;
- скорость движения поезда оказывает стабильно высокое влияние на величину максимальных перепадов аэродинамического давления в тоннеле в интервале расчетных величин;
- коэффициент длины оказывает переменное влияние на величину максимальных перепадов аэродинамического давления: при значениях до 7 влияние более существенное, чем при значениях от 7 до 11, после 11 – влияние снова возрастает.

3.4. Особенности аэродинамического состояния системы «тоннель – воздушная среда – поезд» и характер изменения аэродинамического давления

Оценка влияния факторов в системе однопутных железнодорожных тоннелей на ВСМ при заданной скорости движения поезда и принятых геометрических параметрах тоннеля и поезда осуществляется на основе системного подхода к прогнозу аэродинамического давления: пошагово рассмотрены изменения и ответные реакции системы – характер аэродинамического давления.

На основании данных, полученных по результатам моделирования, и основных наборов параметров для исследований (дополнение по регрессионным зависимостям) были построены графические зависимости влияния параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на значения перепадов аэродинамического давления. Зависимости представлены на рисунках 3.9 – 3.24.

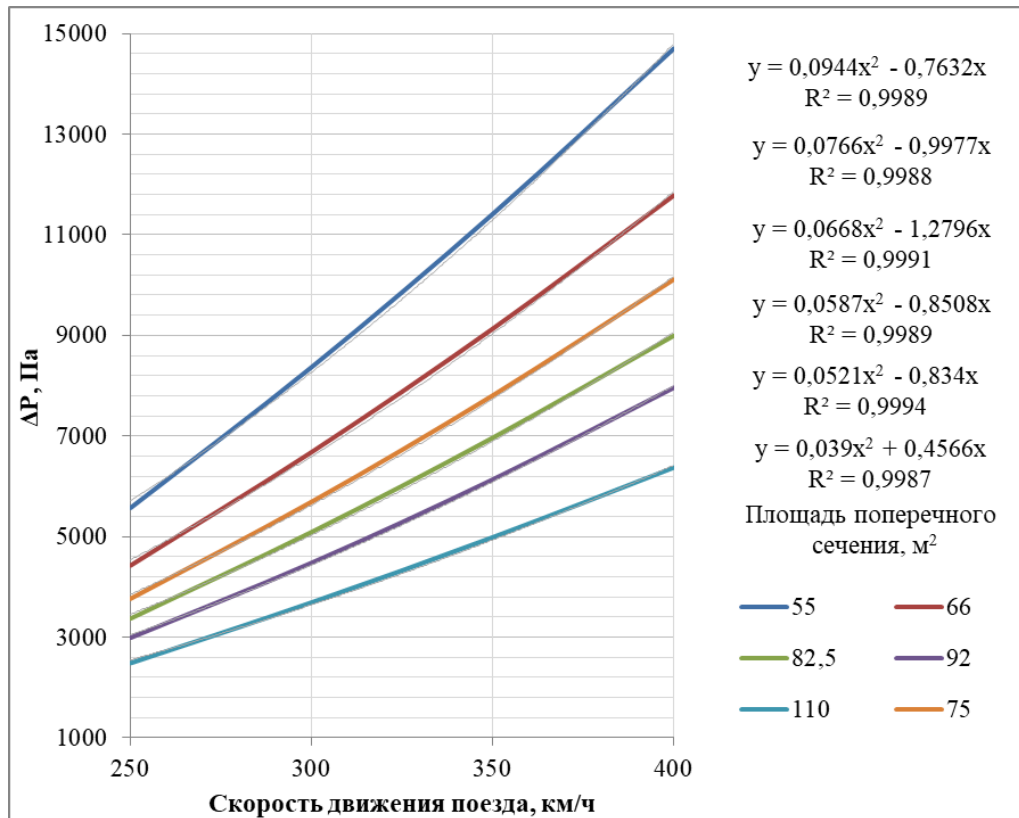


Рисунок 3.9 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от скорости движения поезда при различных площадях поперечного сечения тоннеля и коэффициенте длины $\lambda=3$

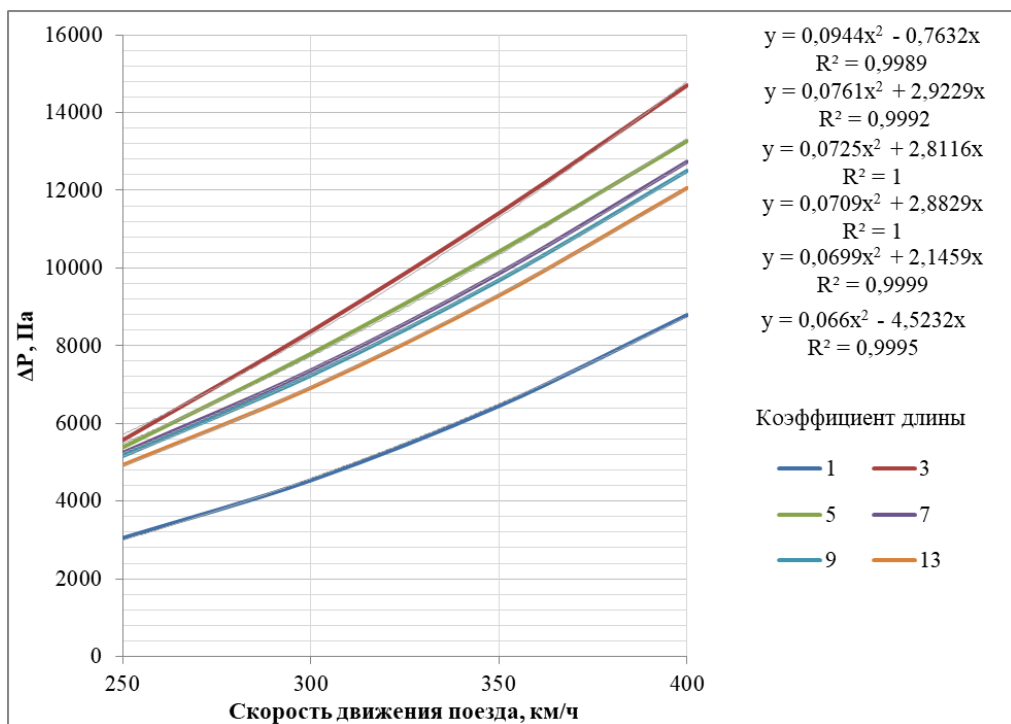


Рисунок 3.10 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от скорости движения поезда при различных коэффициентах длины и коэффициенте блокирования $\beta=0,261$ ($S_{\text{тон}}=55 \text{ м}^2$)

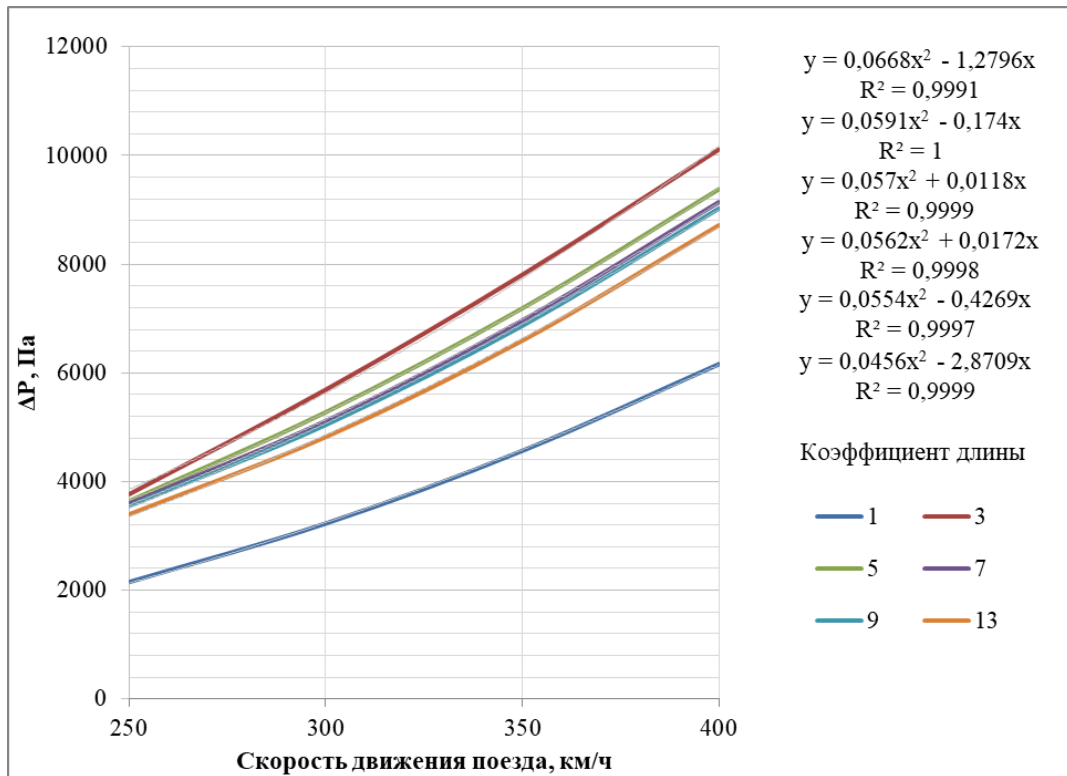


Рисунок 3.11 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от скорости движения поезда при различных коэффициентах длины и коэффициенте блокирования $\beta=0,1916$ ($S_{\text{тон}}=75 \text{ м}^2$)

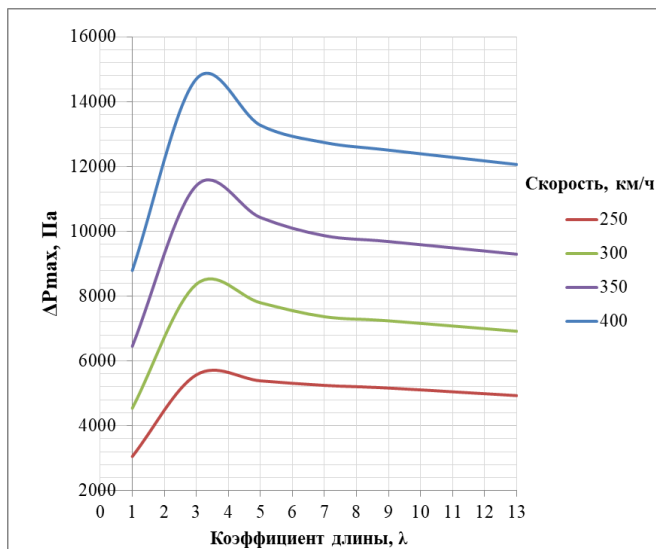


Рисунок 3.12 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента длины при различных скоростях движения поезда и коэффициенте блокирования $\beta=0,261$ ($S_{\text{тон}}=55 \text{ м}^2$)

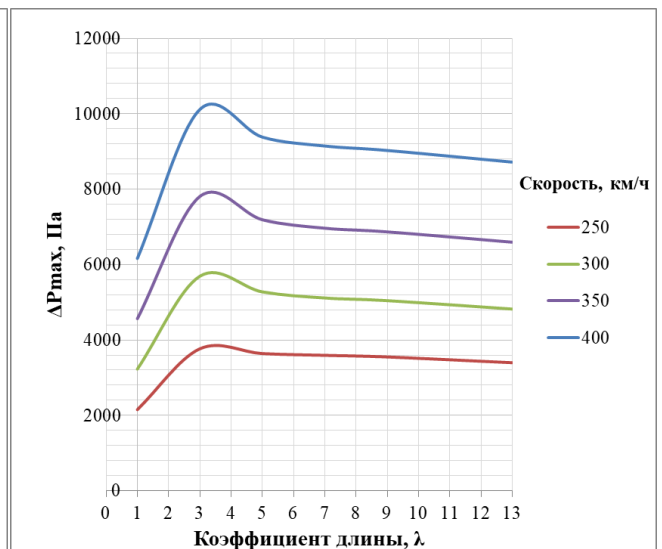


Рисунок 3.13 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента длины при различных скоростях движения поезда и коэффициенте блокирования $\beta=0,1916$ ($S_{\text{тон}}=75 \text{ м}^2$)

Возрастание скорости движения провоцирует увеличение перепада давления: при постоянной величине коэффициента блокирования в интервале от 250 до 400 км/ч перепад давления возрастает в 2,5-2,6 раз (максимальные перепады давления для $\lambda=3$). При постоянной величине коэффициента длины в интервале от 250 до 400 км/ч перепад давления возрастает в 2,5-2,9 раз (возрастание стабильно более, чем вдвое, при различных значениях β).

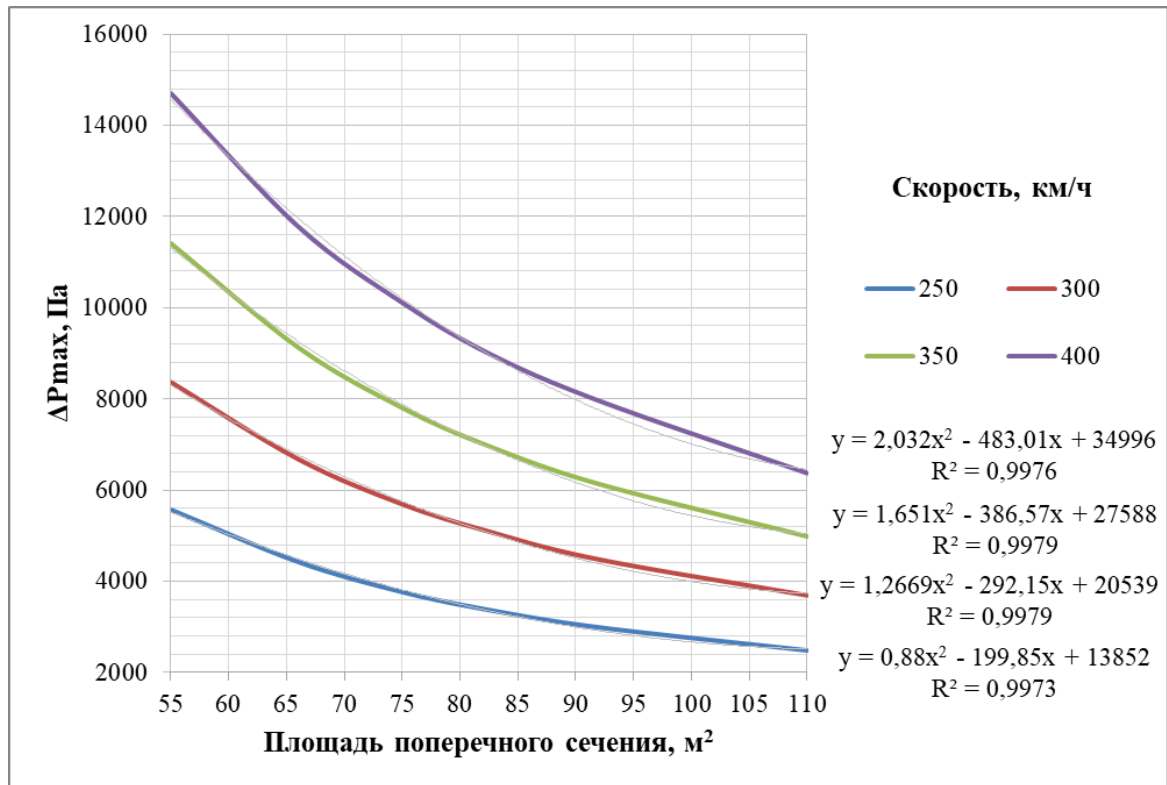


Рисунок 3.14 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от площади поперечного сечения тоннеля при различных скоростях движения поезда и коэффициенте длины $\lambda=3$

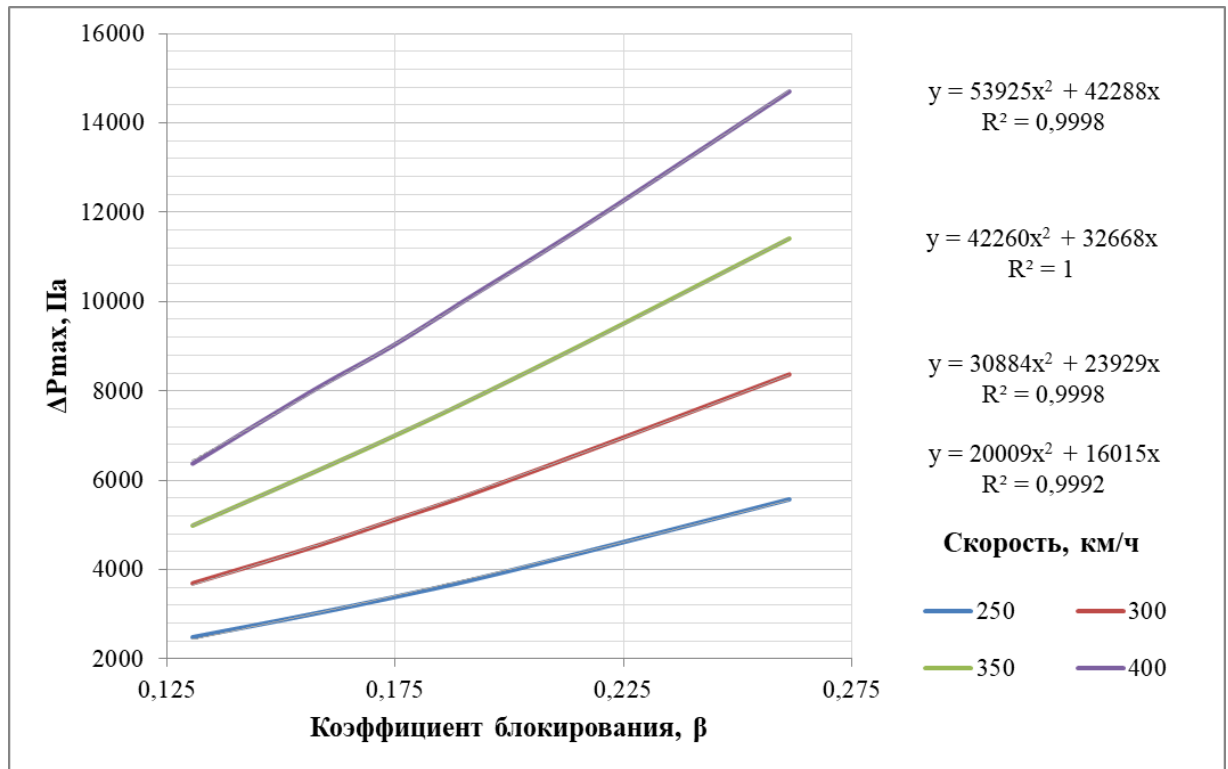


Рисунок 3.15 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента блокирования при различных скоростях движения поезда и коэффициенте длины $\lambda=3$

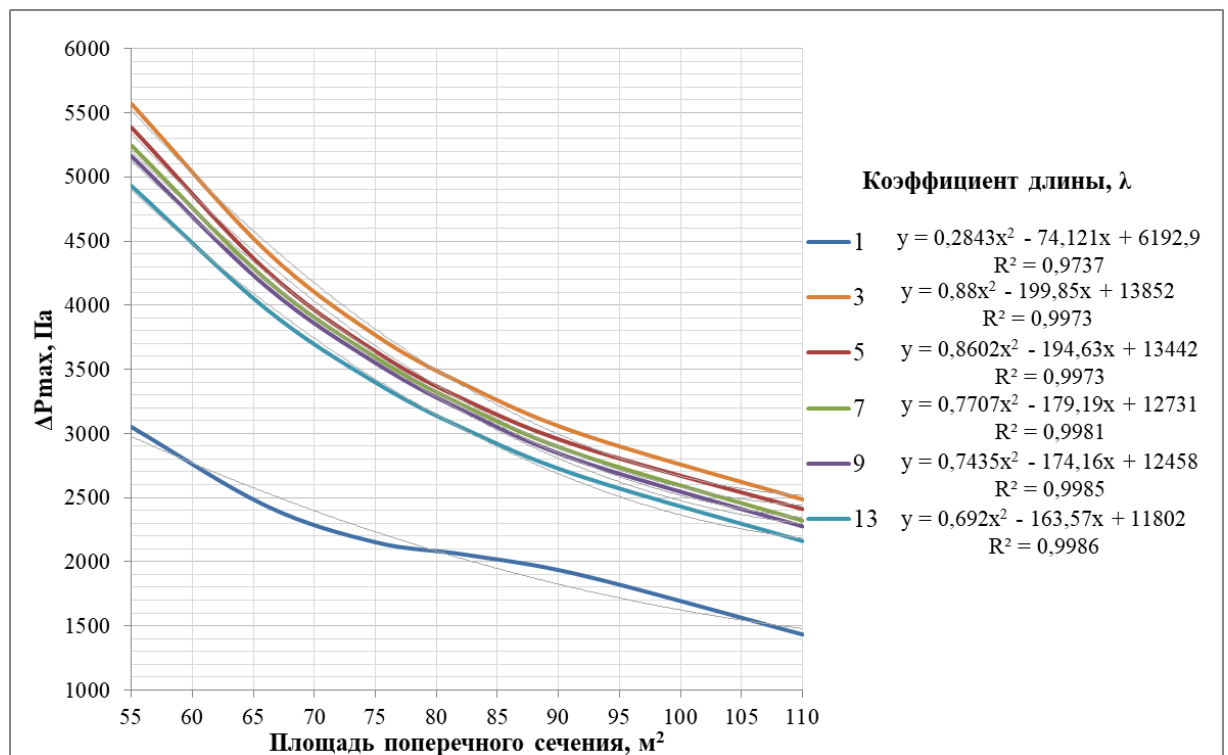


Рисунок 3.16 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от площади поперечного сечения тоннеля при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=250$ км/ч

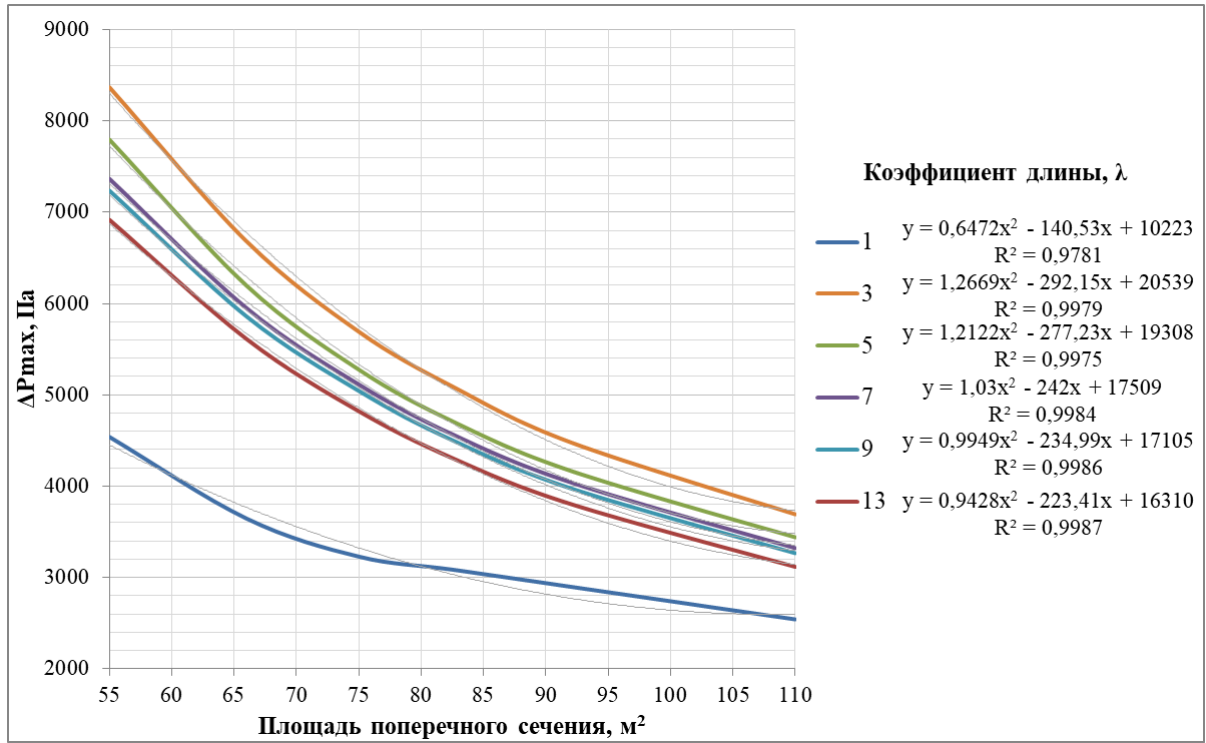


Рисунок 3.17 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от площади поперечного сечения тоннеля при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=300$ км/ч

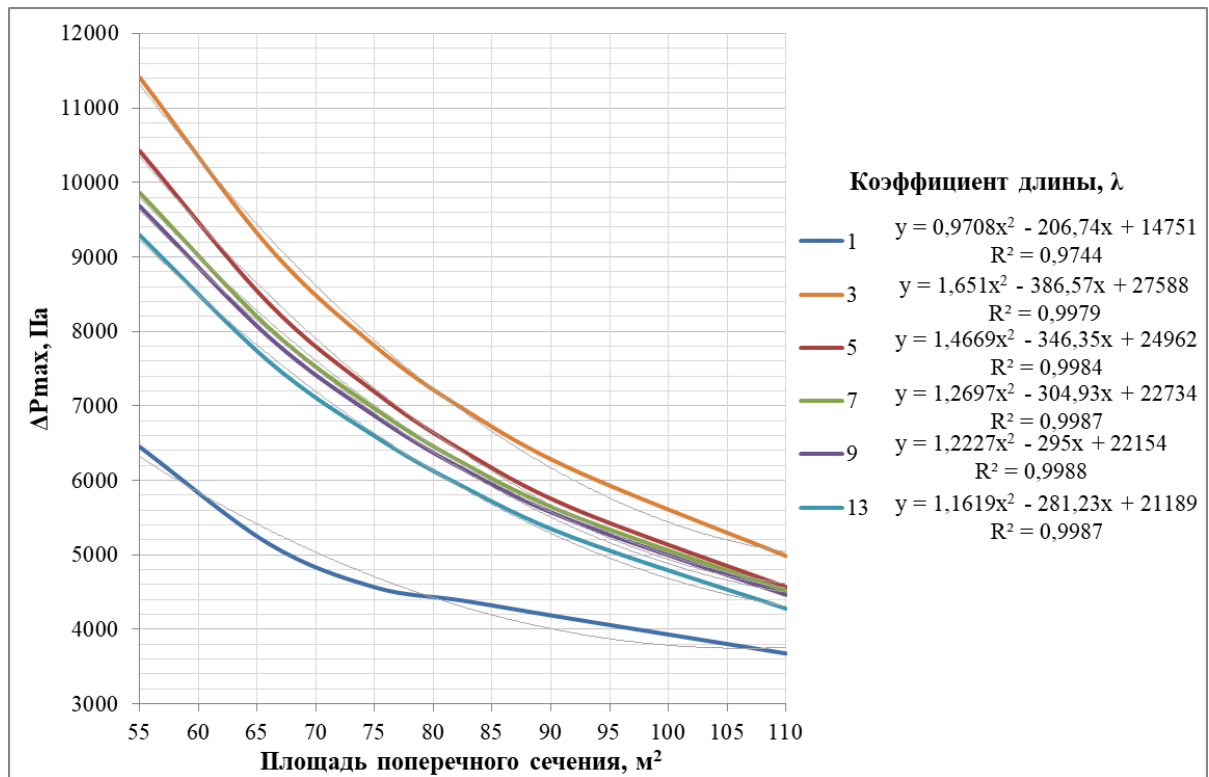


Рисунок 3.18 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от площади поперечного сечения тоннеля при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=350$ км/ч

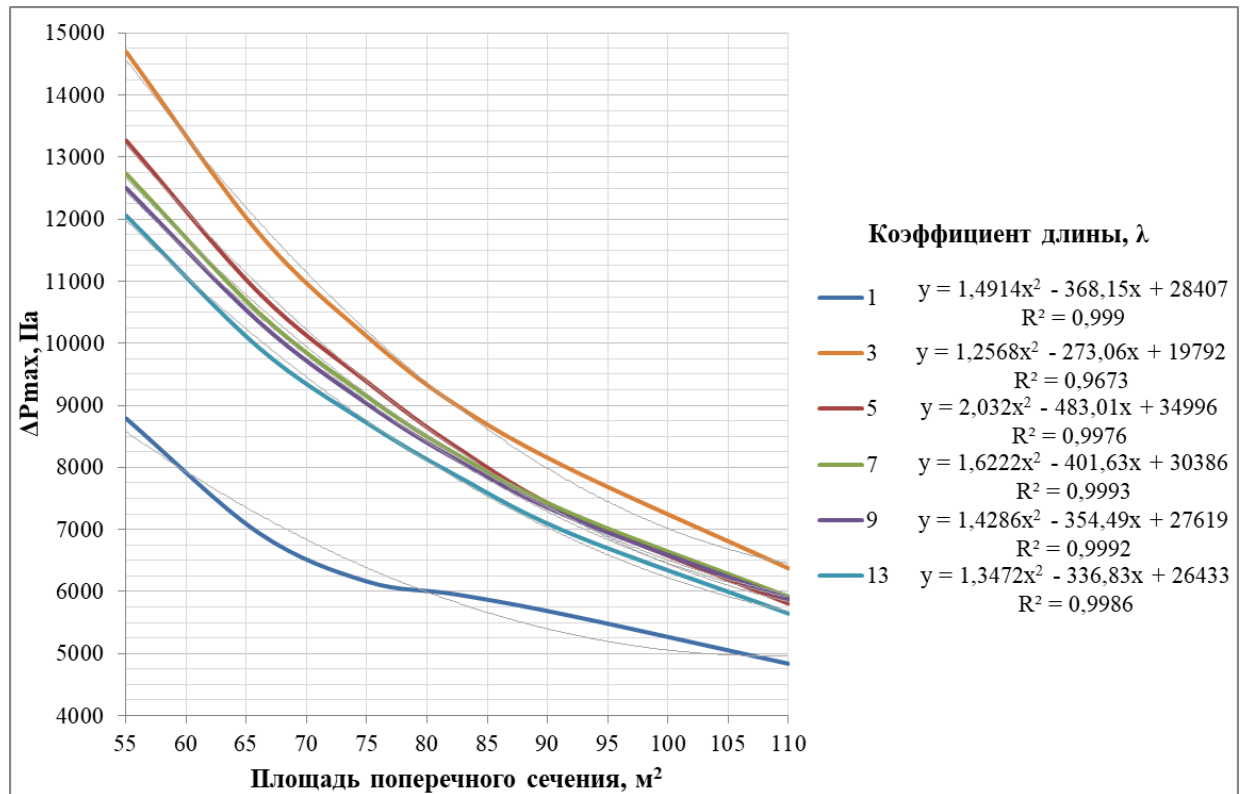


Рисунок 3.19 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от площади поперечного сечения тоннеля при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=400$ км/ч

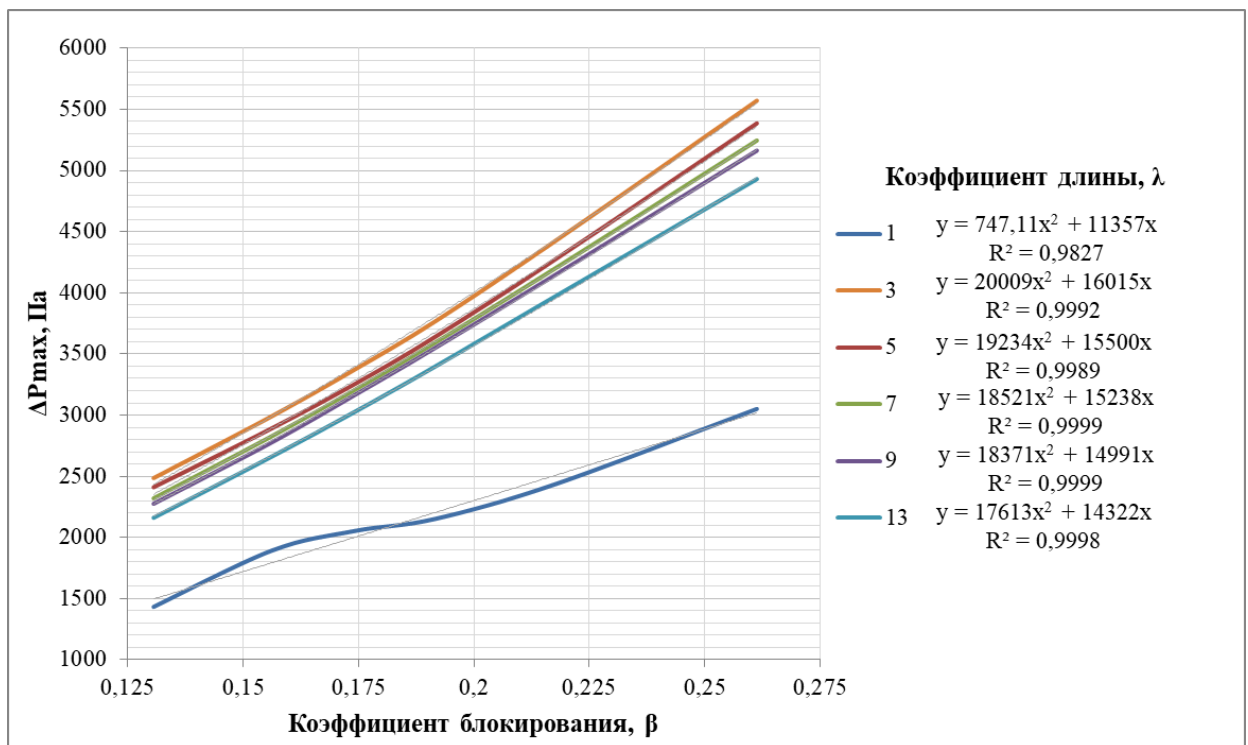


Рисунок 3.20 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента блокирования при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=250$ км/ч

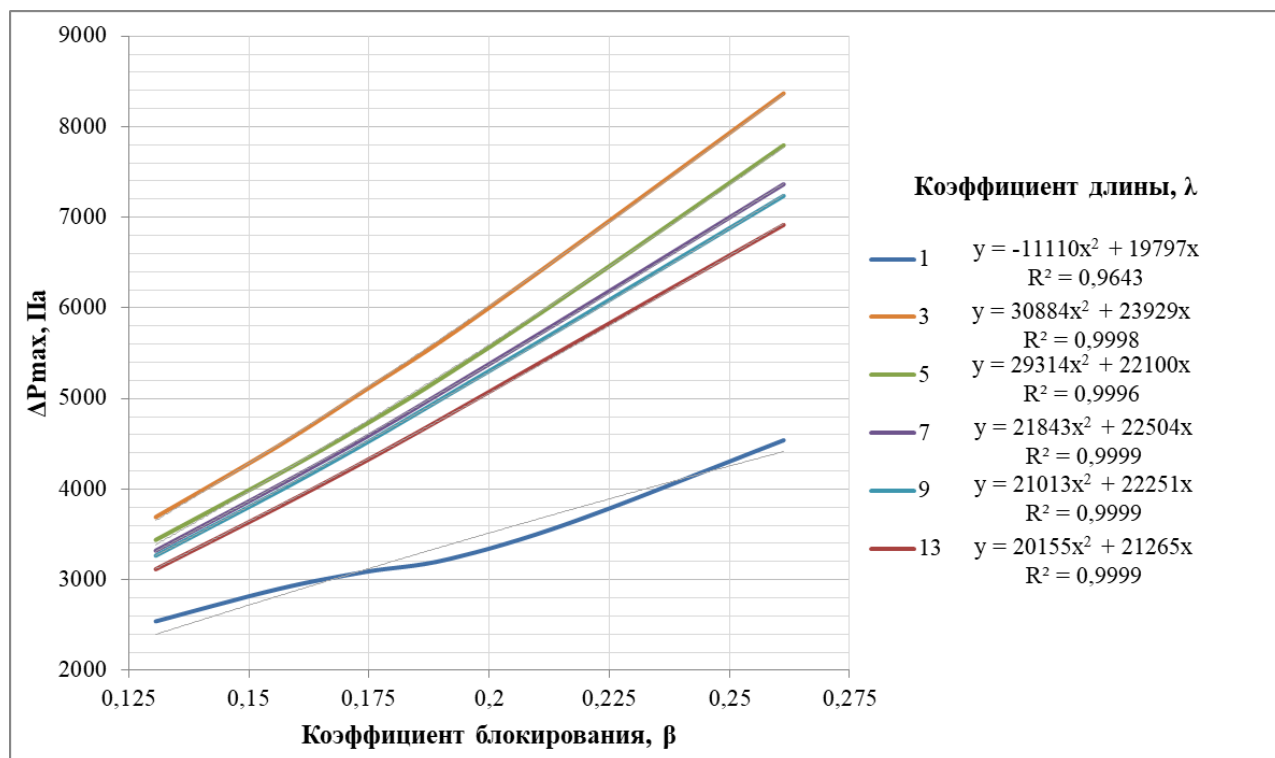


Рисунок 3.21 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента блокирования при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=300$ км/ч

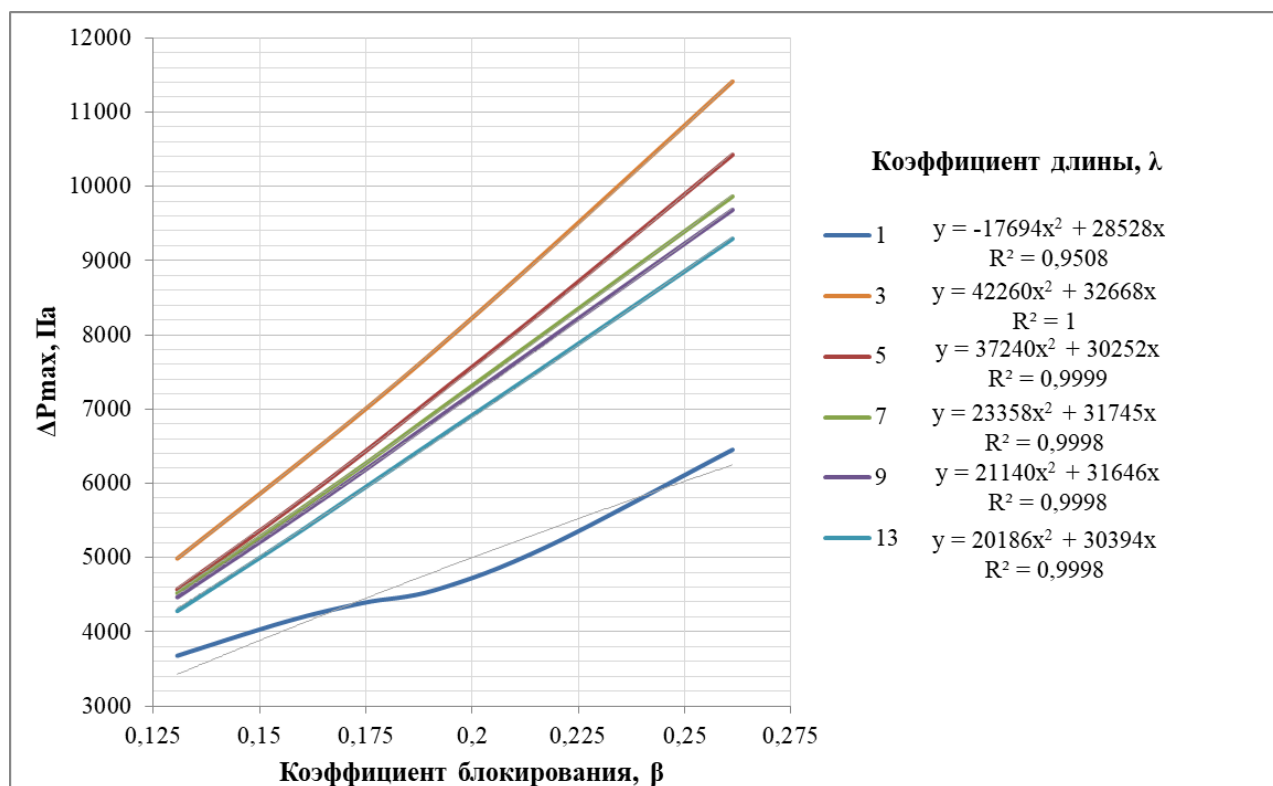


Рисунок 3.22 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента блокирования при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=350$ км/ч

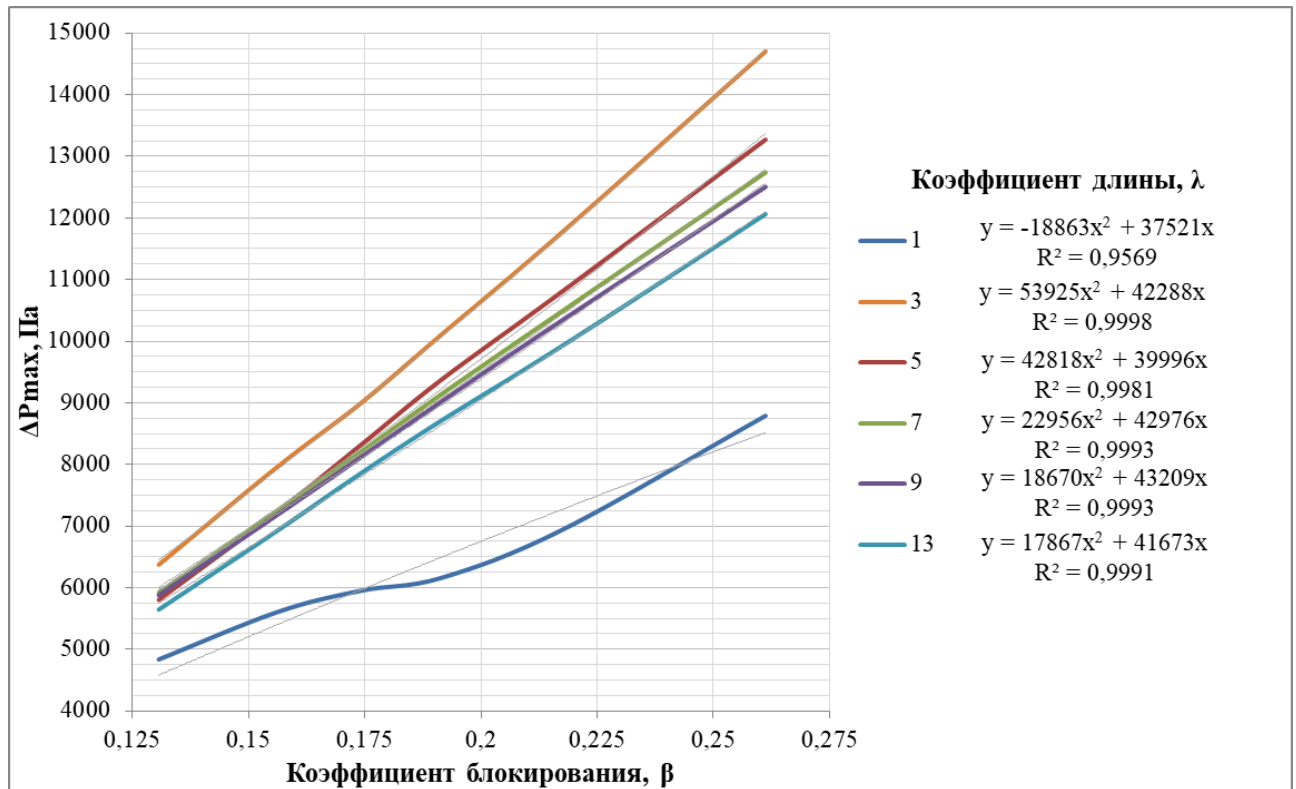
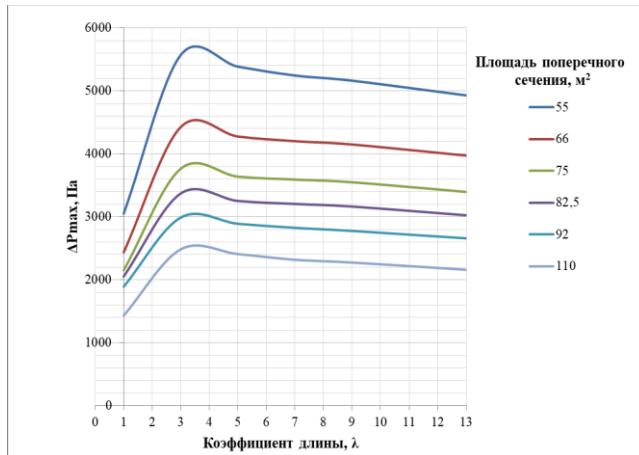


Рисунок 3.23 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента блокирования при различных коэффициентах длины и скорости движения поезда $v=400$ км/ч

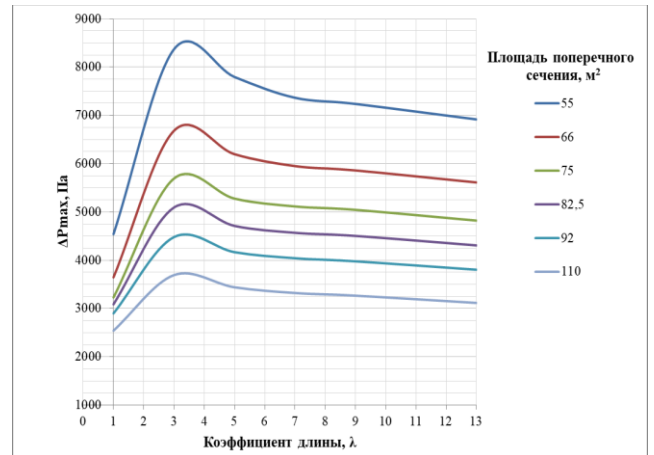
Рост коэффициента блокирования (уменьшение площади поперечного сечения тоннеля) также влечет за собой увеличение перепада давления: при постоянном значении скорости движения поезда в интервале от 110 м^2 до 55 м^2 перепад давления возрастает в 2,2-2,3 раз (максимальные перепады давления для $\lambda=3$). При постоянном значении коэффициента длины в интервале от 110 м^2 до 55 м^2 перепад давления возрастает в 1,75-2,3 раз, причем с ростом скорости движения поезда от 250 до 400 км/ч возрастание перепада давления уменьшается (с диапазона от 2,1 до 2,3 раз при скорости 250 км/ч, до диапазона 1,8-2,1 при скорости 400 км/ч).

При постоянном значении коэффициента блокирования в интервале от 250 до 400 км/ч перепад давления возрастает в 2,4-2,9 раз (максимальный рост перепадов давления для $\lambda=\min$ до $\lambda=3..4$, при увеличении λ рост оказывается примерно в 2,5 раза). При постоянном значении скорости движения поезда от 110 м^2 до 55 м^2 перепад давления возрастает в 1,75-2,3 раз.

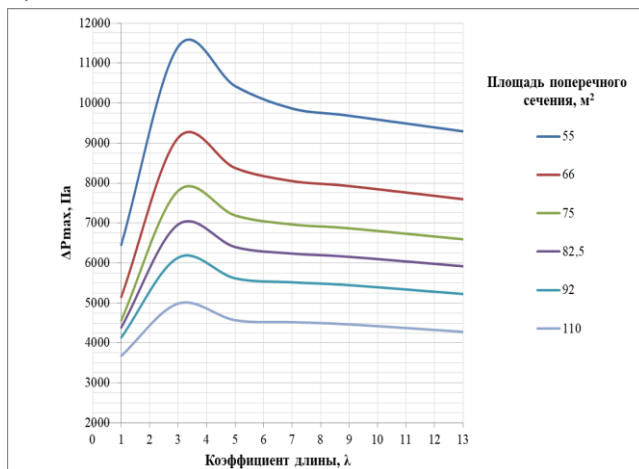
а)



б)



в)



г)

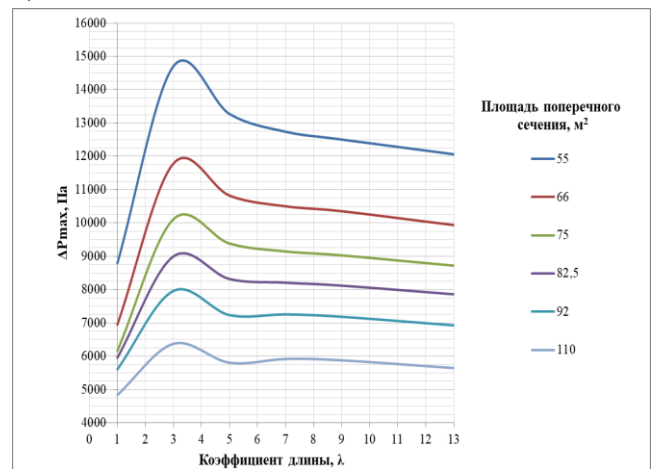


Рисунок 3.24 – Зависимость амплитуды аэродинамического давления от коэффициента длины при различных площадях поперечного сечения тоннеля и скорости движения поезда: а) $v=250$ км/ч; б) $v=300$ км/ч; в) $v=350$ км/ч; г) $v=400$ км/ч

Рост коэффициента длины наиболее неоднозначным образом влияет на изменение перепада давления. Наиболее интенсивные перепады давления и экстремальные значения возникают в интервале $\lambda=2..6$, с наиболее вероятным экстремумом при $\lambda=3..4$. Общая картина изменения давления в зависимости от изменения коэффициента длины при постоянной скорости движения поезда либо коэффициенте блокирования представляется следующим образом: от $\lambda=\min$ до $\lambda=3..4$ происходит интенсивный рост перепада давления до достижения экстремального значения; от $\lambda=3..4$ до $\lambda=5..6$ (в случае прохождения поездом тоннеля со скоростями 350-400 км/ч, $\lambda=5..7$) происходит уменьшение перепада давления на 10-20% от максимального, после чего давление стабильно уменьшается, но неинтенсивно.

По результатам моделирования были построены поверхности амплитуды давления для различных исходных данных системы – скорости движения поезда, коэффициентов блокирования и длины (рисунки 3.25 – 3.28).

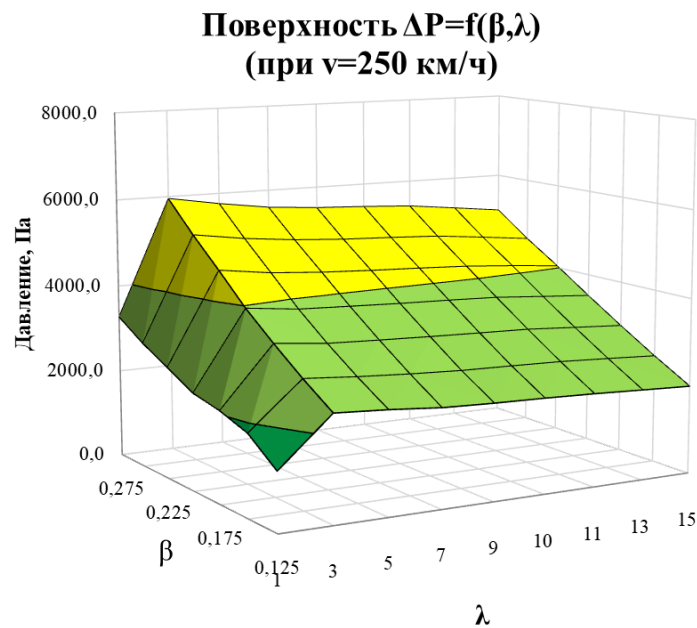


Рисунок 3.25 – Поверхность амплитуды аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» для различных коэффициентов блокирования и длины при скорости движения поезда 250 км/ч

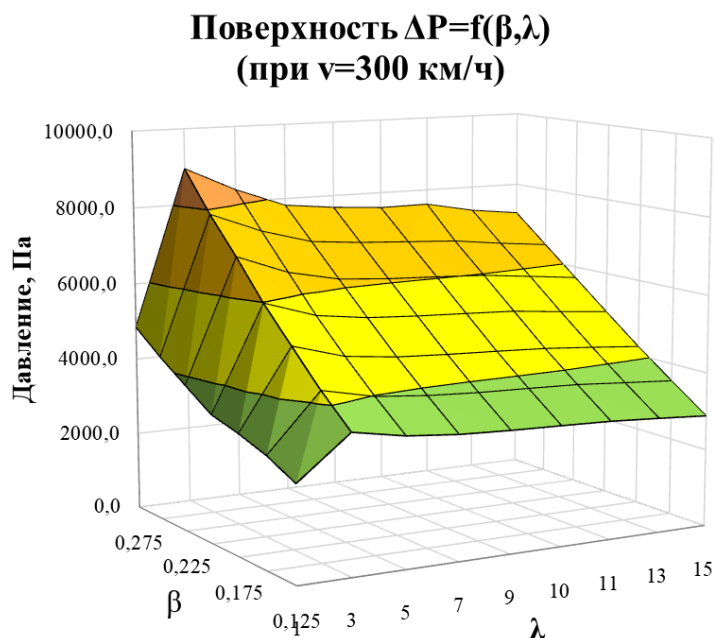


Рисунок 3.26 – Поверхность амплитуды аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» для различных коэффициентов блокирования и длины при скорости движения поезда 300 км/ч

Поверхность $\Delta P=f(\beta,\lambda)$
(при $v=350$ км/ч)

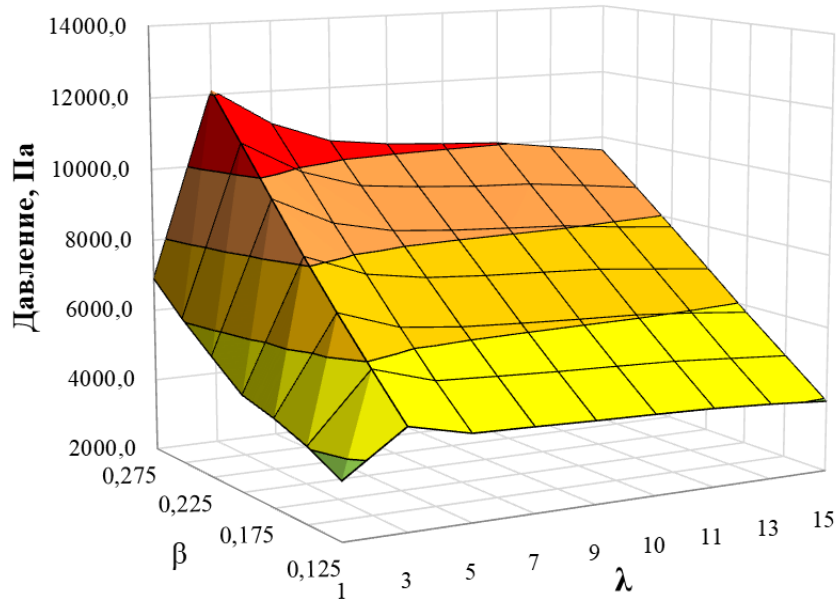


Рисунок 3.27 – Поверхность амплитуды аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» для различных коэффициентов блокирования и длины при скорости движения поезда 350 км/ч

Поверхность $\Delta P=f(\beta,\lambda)$
(при $v=400$ км/ч)

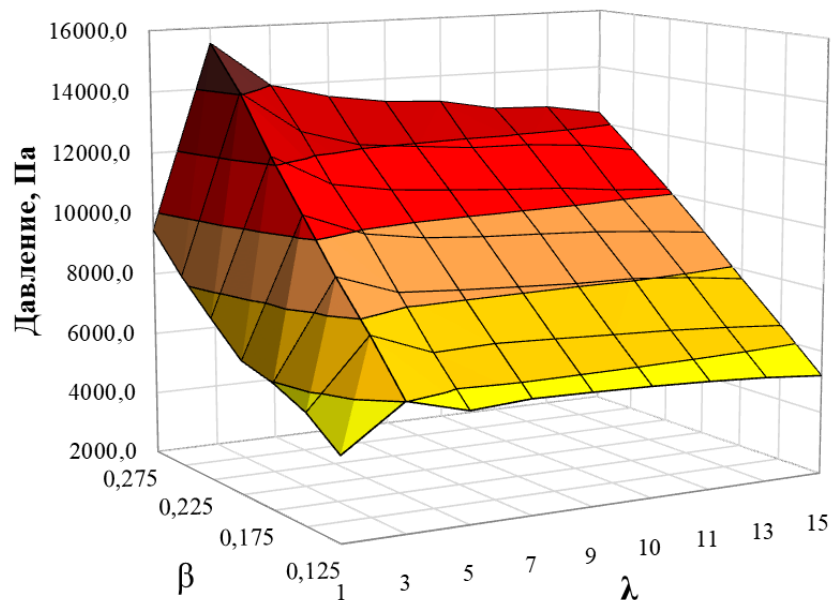


Рисунок 3.28 – Поверхность амплитуды аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» для различных коэффициентов блокирования и длины при скорости движения поезда 400 км/ч

В связи с невозможностью игнорирования одновременного влияния всех геометрических параметров системы на перепады давления, поверхности аэродинамического давления позволяют полноценно оценить процесс изменения давления в зависимости от группы факторов. Рост коэффициента блокирования провоцирует увеличение давления, тогда как рост коэффициента длины сначала приводит перепад давления к экстремуму, после чего происходит уменьшение давления, его стабилизация. Формирование поля аэродинамического давления отличается выраженной динамической составляющей. Вместе с тем, при уменьшении коэффициента блокирования значения максимального перепада давления снижаются. Уменьшение коэффициента блокирования не исключает формирования волнового поля, но позволяет снизить максимальную величину давления в пределах критерия безопасности.

При определенном наборе параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» увеличение скорости от 250 км/ч до 400 км/ч может повлечь за собой возрастание давления более, чем в 2,5 раза. Площадь поперечного сечения тоннеля и коэффициент блокирования оказывают более существенное влияние при значениях менее 80-82,5 м² и более 0,1796-0,174 соответственно. Длина тоннеля и коэффициент длины влияют на значение давления неравномерно: из-за явления интерференции волн интенсивный рост и пиковые значения амплитуды приходятся на значения $\lambda=2..7$, при этом с ростом величины λ изменения затухают и аэродинамическое давление уменьшается относительно максимума, оставаясь избыточным. Практически все зависимости могут быть определены полиномами 2 степени, за исключением зависимостей давления от коэффициента длины, где определение с достаточной достоверностью (R^2 выше 85%) возможно только полиномами 4 степени.

Отмечено, что с наибольшей вероятностью при максимально возможном коэффициенте блокирования и максимально возможной скорости движения поезда максимальный перепад давления в тоннеле происходит при $\lambda=3..4$. С ростом скоростей движения до 350-400 км/ч рост перепадов давления в интервале $\lambda=3..4$ происходит наиболее интенсивно, достигая значений 15-16 кПа.

3.5. Обоснование критериев оптимизации системы «тоннель – воздушная среда – поезд»

Цель оптимизационной задачи – определение рационального решения для подбора значений площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ в зависимости от параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» (скорость движения поезда, коэффициенты блокирования и длины). В заданных начальных условиях определены значения аэродинамического давления (предельная величина давления не должна превышать 10 кПа за любой интервал времени в тоннеле на ВСМ) для перехода к решению задачи оптимизации и определению площади поперечного сечения.

Решение задач поиска оптимального решения (области допустимых значений) является инструментом, позволяющим определить рациональные, полнофакторные и целесообразные технико-экономические варианты. С учетом уровня ответственности тоннелей на ВСМ их протяженности и обоснования возможности уменьшения площади поперечного сечения однопутных тоннелей, актуальными являются задачи оптимизации в области проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей на ВСМ.

Площадь поперечного сечения тоннеля на ВСМ зависит от различных факторов, основными определяющими остаются традиционные факторы: инженерно-геологические условия строительства и габариты подвижного состава и приближения строений. В отечественной нормативной документации (при скоростях движения поездов до 350 км/ч) рекомендуется назначать площадь поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ не менее 75 м², двухпутных – 110 м², при этом не приведено обоснования данных значений. Известно, что габарит С400Т, применяемый для проектирования тоннелей на ВСМ, возможно вписать в сечение меньшей площади. Проектируемая площадь поперечного сечения может оказаться избыточной, о чем говорит опыт успешной эксплуатации (с соблюдением критериев безопасности) зарубежными странами однопутных железнодорожных тоннелей с меньшей площадью поперечного сечения.

Возможная избыточность значения площади поперечного сечения тоннеля в условиях высокоскоростного движения поездов ведёт к удорожанию строительства, с учетом соблюдения всех возможных ужесточенных требований к сооружениям ее следует устранять. Это обуславливает область возможной рационализации и научно-исследовательского обоснования оптимальных величин площади поперечного сечения тоннелей на ВСМ.

Критерием оптимальности является количественная оценка оптимизируемого качества или параметра объекта. Критерием оптимизации определена величина коэффициента блокирования при максимальных эксплуатационных скоростях движения поездов с учетом соблюдения критериев безопасности и аэродинамики (ограничение верхнего значения допустимого перепада аэродинамического давления не более 10 кПа за любой интервал времени движения в тоннеле на ВСМ). В настоящем исследовании решается задача минимизации площади поперечного сечения тоннеля (увеличение коэффициента блокирования):

$$\begin{aligned} & S_t \rightarrow \min; \\ \text{или} & \\ & \beta \rightarrow \max. \end{aligned} \tag{3.12}$$

Известно, что «параметры оптимизации связаны с факторами некоторыми зависимостями. Если объектом исследования является физический объект или процесс, то эту зависимость выражают уравнением, в общем виде:

$$y = f(x_1 \dots x_n). \tag{3.13}$$

Математическая модель будет представлять собой функционал

$$y = F(x_n), \tag{3.14}$$

где $X_n \in E_x$, E_x – область определения факторного пространства.

Под оптимизацией понимается процесс нахождения максимума или минимума функции цели (параметра оптимизации):

$$Y(x_1 \dots x_n). \tag{3.15}$$

При условии, что изображающая точка в пространстве варьируемых факторов $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ принадлежит допустимому множеству E_x , которое определяется совокупностью:

при m ограничениях – равенствах

$$\varphi_i(x_i) = 0, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.16)$$

и k ограничениях – неравенствах

$$\psi_j(x_j) \geq 0, (j = 1, 2, \dots, k), \quad (3.17)$$

где φ_i, ψ_i - некоторые функции факторов x_1, x_2, \dots, x_n , накладывающие ограничения на предельно допустимые значения некоторых из них, например, положительность или их целочисленность в силу физического смысла. Эти ограничения могут изображаться не только поверхностями в n - мерном пространстве, но и линиями или отдельными точками на поверхности функции цели» [35].

Допустимым решением данной задачи будет являться упорядоченное множество чисел (x_1, x_2, \dots, x_n) , удовлетворяющее ограничениям – точка в n - мерном пространстве. Постановка задачи условной оптимизации коэффициента блокирования однопутных железнодорожных тоннелей на ВСМ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \beta \rightarrow \max \\ 250 \leq v_i \leq 400 \text{ км/ч,} \\ \Delta p \leq 10 \text{ кПа,} \\ \beta_{\text{пред.с}} \leq \beta \rightarrow \max \leq \beta_{\text{крит.}\Delta p} \\ \text{ОДЗ } S_{\text{opt}} \leftarrow F(X_1 \dots X_n) \rightarrow \Delta p_{\text{max}} \leq \Delta p_{\text{crit}} \end{array} \right\} \quad (3.18)$$

Задача определения экстремума может быть решена симплексным методом. Допустимое решение, определяющее экстремум целевой функции, будет являться оптимальным – величина коэффициента блокирования при максимальных эксплуатационных скоростях движения поездов с учетом соблюдения критериев безопасности и аэродинамики (ограничение верхнего значения допускаемого перепада аэродинамического давления не более 10 кПа за любой интервал времени в тоннеле на ВСМ).

Поверхность отклика (рисунок 3.29) представляет собой проекцию точек, определяющих области перепадов аэродинамического давления определенной величины: проекция линии 10 кПа является ограничением максимального давления. Эта линия содержит множество точек, являющихся граничными

значениями $\beta_{crit.\Delta P}$ в зависимости от коэффициента длины λ . Таким образом, при любых исходных условиях возможно определить оптимальный коэффициент блокирования однопутных железнодорожных тоннелей на ВСМ.

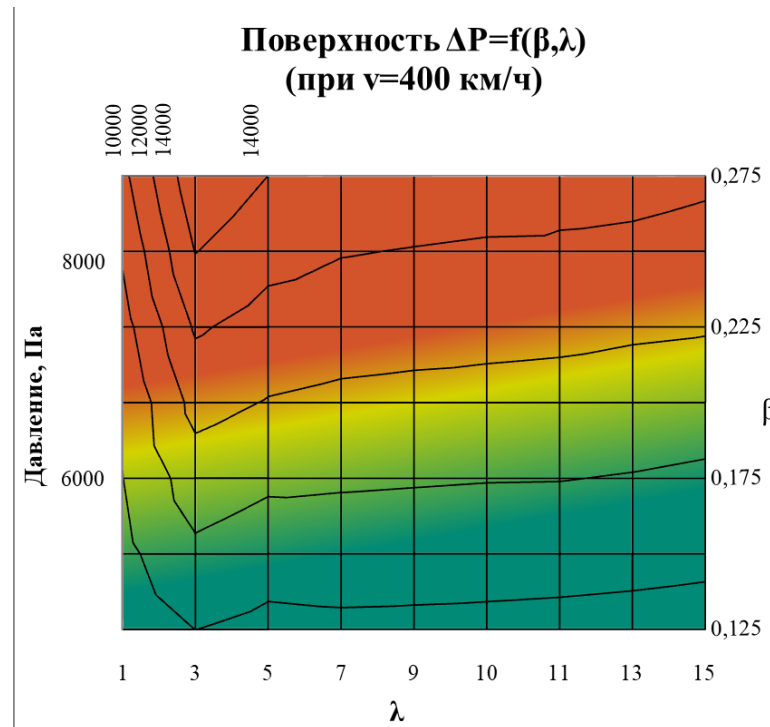


Рисунок 3.29 – Поверхность отклика значений амплитуды аэродинамического давления системы «тоннель – воздушная среда – поезд» для различных коэффициентах блокирования и длины при скорости движения поезда 400 км/ч

3.6. Обоснование значений площади поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ

В качестве характерных зависимостей, полученных на основании результатов моделирования и расчетно-теоретического анализа, приведены графики влияния механических параметров исследуемой системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на геометрические, тем самым продемонстрирована их взаимосвязь. На рисунке 3.30 представлен график, отражающий рост давления с увеличением скорости и изменением площади поперечного сечения тоннеля при постоянном коэффициенте длины $\lambda=3$.

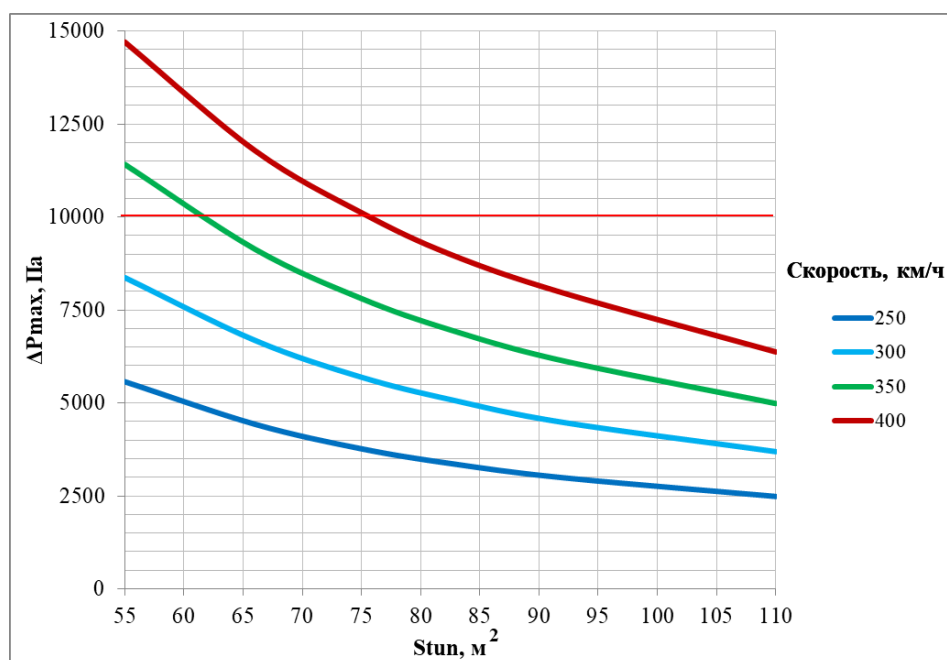


Рисунок 3.30 – Зависимость аэродинамического давления в тоннеле от площади поперечного сечения и скорости прохождения поезда (красной горизонтальной линией указан критический перепад давления в тоннеле)

Граничным условием выступают требования по безопасности в УИС 779-11, по которым критерий безопасности перепада давления в 10 кПа (выделен красной чертой), указанный в технических условиях РФ, не должен быть превышен. Условие должно быть выполнено для всего диапазона исследуемых скоростей движения поезда, ограничение перепада давления влияет на определяемый оптимизируемый параметр площади поперечного сечения тоннеля (коэффициент блокирования).

В соответствии с графиком 3.30 при постоянном коэффициенте длины $\lambda=3$ безопасными являются следующие значения площади поперечного сечения для однопутных тоннелей на ВСМ:

- при скорости движения поезда до 300 км/ч включительно в условиях наиболее вероятного возникновения максимального перепада давления величины площади поперечного сечения тоннеля вплоть до $55 m^2$ не приводят к перепадам давления, превышающим критические (в соответствии с рекомендуемым критерием безопасности перепада давления в 10 кПа);

- при скорости движения поезда 350 км/ч в условиях наиболее вероятного возникновения максимального перепада давления величины площади

поперечного сечения тоннеля более $61,40 \text{ м}^2$ не приводят к перепадам давления, превышающим критические (в соответствии с рекомендуемым критерием безопасности перепада давления в 10 кПа);

- при скорости движения поезда 400 км/ч в условиях наиболее вероятного возникновения максимального перепада давления величины площади поперечного сечения тоннеля более $75,70 \text{ м}^2$ не приводят к перепадам давления, превышающим критические (в соответствии с рекомендуемым критерием безопасности перепада давления в 10 кПа).

В отечественной нормативной документации при скоростях движения поездов до 350 км/ч рекомендуется назначать площадь поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ не менее 75 м^2 , тогда как величины площади поперечного сечения тоннеля более $61,40 \text{ м}^2$ не приводят к перепадам давления, превышающим критические.

Характерный пример зависимости значений амплитуды аэродинамического давления от скорости движения поезда, полученный на основании результатов моделирования и расчетно-теоретического анализа, представлен на рисунке 3.31.

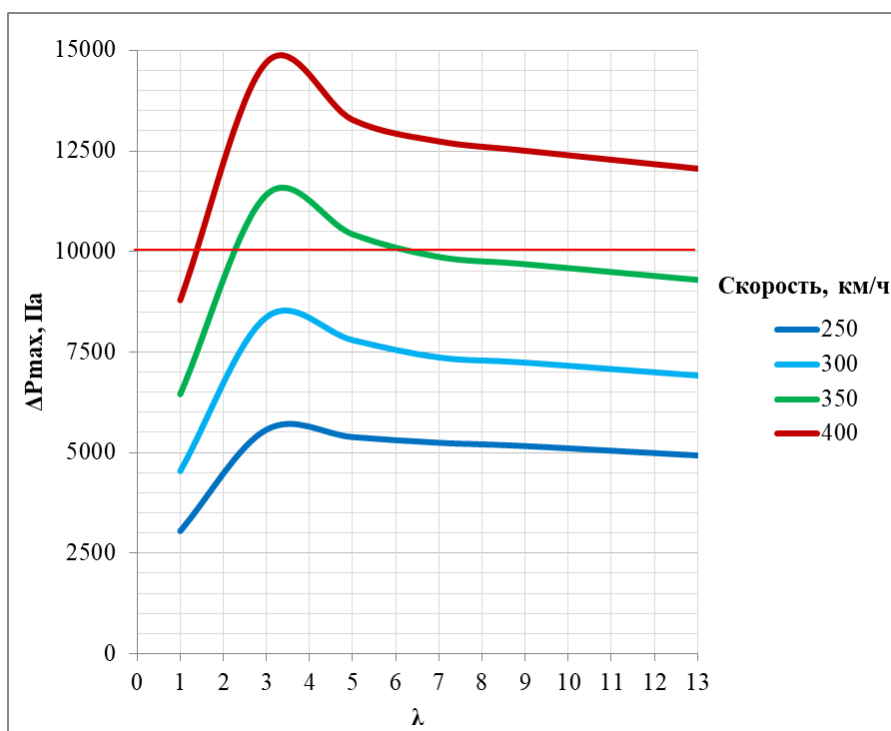


Рисунок 3.31 – Характерный график зависимости перепадов аэродинамического давления от скорости движения поезда, отношения длин тоннеля и поезда

На данном графике представлена зависимость величин максимального перепада давления от коэффициентов длины при разных скоростях движения поезда в тоннеле при постоянном коэффициенте блокирования $\beta=0,261$ (что соответствует $S_{\text{тон}}=55 \text{ м}^2$). В соответствии указанным графиком отмечено:

- при скорости движения поезда 400 км/ч однопутный тоннель на ВСМ при коэффициенте блокирования 0,261 не приводит к критическим перепадам давления лишь при $\lambda \leq 1,40$ (при десятивагонном высокоскоростном поезде длиной 250 м соответствует длине тоннеля 350 м, что является рекомендуемой длиной для сооружения двухпутных тоннелей в соответствии с нормативной документацией);

- при скорости движения поезда 350 км/ч однопутный тоннель на ВСМ при коэффициенте блокирования 0,261 приводит к критическим перепадам давления в интервале $2,40 \leq \lambda \leq 6,50$;

- при скорости движения поезда до 300 км/ч включительно при коэффициенте блокирования 0,261 не приводят к перепадам давления, превышающим критические.

Результаты выполненных аэродинамических расчетов для тоннелей на ВСМ демонстрируют широкие возможности варьирования геометрических параметров тоннеля при получении оптимальных вариантов площади поперечного сечения при условии выполнения требований по ограничению амплитуды давления. При назначении основных параметров тоннеля (площадь поперечного сечения и длина тоннеля), определяющих значение аэродинамического давления, можно добиться смягчения предельного давления. При увеличении коэффициента блокирования и росте скорости аэродинамическое давление вероятнее всего будет приближаться к предельному значению. При скоростях движения поездов более 300 км/ч полноценное исключение экстремальных перепадов аэродинамического давления фактически не является возможным.

Амплитуды давления возрастают при росте скорости, а увеличение длины поезда (уменьшение коэффициента длины) приводит к более интенсивному изменению давления. Следует отметить, что тоннель в 3-5 раз больший по длине, чем подвижной состав, характеризуется более существенными значениями

колебаний давления, по сравнению с тоннелями, большими в 8 и более раз. Это обстоятельство позволяет рекомендовать на этапе проектирования назначение коэффициента длины как один из эффективных потенциальных методов снижения аэродинамического эффекта в тоннелях. Для тоннелей с коэффициентом длины 2-7 основного экстремального перепада аэродинамического давления избежать невозможно. В связи с этим выполнение требований соблюдения критерия безопасности перепада давления в 10 кПа необходимо обеспечивать путём уменьшения коэффициента блокирования.

В отечественной нормативной документации при скорости движения поездов до 350 км/ч рекомендуется назначать площадь поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ не менее 75 м^2 , тогда как площади поперечного сечения более $61,40 \text{ м}^2$ не приводят к перепадам давления, превышающим критические. Таким образом, на основании расчетного обоснования возможно безопасно уменьшить значение площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ в пределах 18%.

Руководствуясь полученными зависимостями, возможно графически интерпретировать область допустимых значений безопасной площади поперечного сечения тоннелей, а также прогнозировать на этапе проектирования значения вероятных перепадов аэродинамического давления. В совокупности с применением коэффициента длины, унифицирующим длины поездов и тоннелей на ВСМ, графический результат решения задачи определения значений площади поперечного сечения тоннеля на ВСМ является удобным инструментом для практического применения.

3.7. Разработка рекомендаций по назначению площади поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ с учетом аэродинамики

На рисунке 3.32 представлен график, на котором аппроксимированные кривые (полученные на основании результатов моделирования и расчетно-теоретического анализа) в условиях различных скоростей движения поезда обуславливают границы критического перепада давления в 10 кПа.

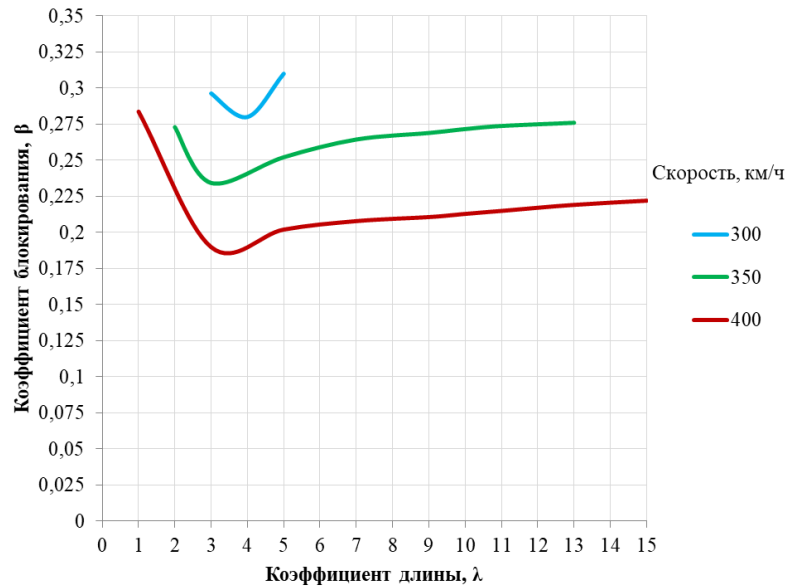


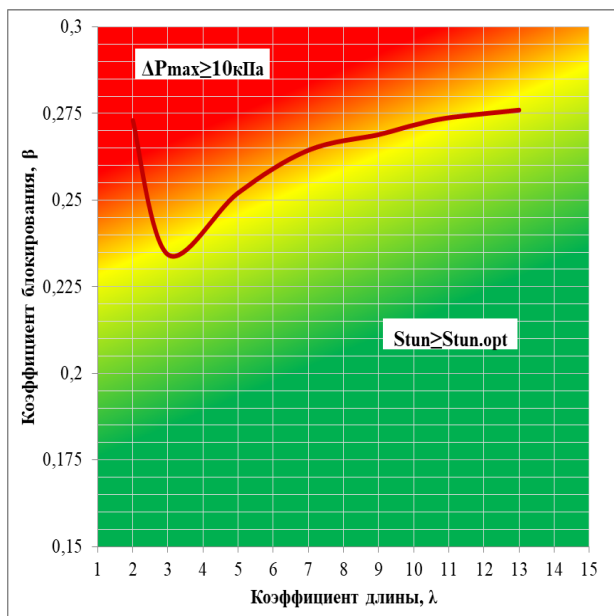
Рисунок 3.32 – График зависимости коэффициента блокирования от скорости движения поезда в тоннеле (300-400 км/ч) и коэффициента длины при соблюдении критерия безопасности по перепаду давления $\Delta P \leq 10$ кПа

Эти границы определяют теоретические зоны оптимума: как видно из приведенного графика в нижней области расположены допустимые значения площади поперечного сечения тоннеля, отвечающие ограничению по перепаду давления, а в верхней области – множество значений, не удовлетворяющих условию безопасности – при данных значениях коэффициента блокирования β перепад давления при заданной скорости движения поезда превысит критический в 10 кПа. Следует отметить, что максимальный перепад давления в тоннеле зависит в том числе от коэффициента длины λ и может значительно отличаться при различных значениях λ , некоторые из которых определяют наименее благоприятные аэродинамические условия в тоннеле, тем самым оказывая влияние на оптимальные значения β . Это происходит по причине отражения тоннельных волн давления, которые распространяются на всю длину тоннеля в процессе движения поезда, вызывая колебания и перепады давления, что приводит к превышению критического (10 кПа). Прогноз аэродинамического взаимодействия в многофакторной системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения определяет возможность управления аэродинамическим давлением, перспективы его минимизации путем всестороннего рассмотрения влияющих факторов и рационализации геометрических параметров тоннеля с постоянным скоростным режимом движения поездов [59, 122].

На рисунках 3.33 а) и б) представлены области допустимых значений – зависимость требуемого коэффициента блокирования (для определения оптимальной площади поперечного сечения тоннеля) от скорости движения поезда в тоннеле (350 и 400 км/ч) и коэффициента длины при соблюдении критерия безопасности по перепаду давления $\Delta P \leq 10$ кПа

Практическое применение графика на рисунке 3.33 заключается в следующем: при проектировании тоннеля определенной длины, задаваясь критерием безопасности (критическая амплитуда давления $\Delta P \leq 10$ кПа) и скоростью эксплуатации поездов, возможно определить область допустимых значений для площади поперечного сечения тоннеля на ВСМ. В этой области в зависимости от исходных данных проектирования и требуемых параметров железнодорожной магистрали возможно определить рациональную площадь поперечного сечения тоннеля. Это позволяет решать важнейшую из рассматриваемых задач – определение безопасной (оптимальной) площади поперечного сечения тоннеля $S_{\text{tun.opt}}$ в зависимости от скорости движения поезда.

а)



б)

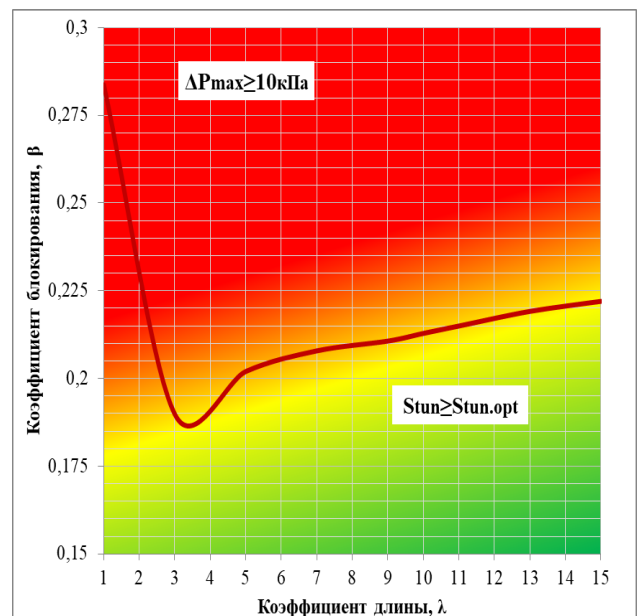


Рисунок 3.33 – График зависимости требуемого коэффициента блокирования (для определения оптимальной площади поперечного сечения тоннеля) от скорости движения поезда в тоннеле и коэффициента длины при соблюдении критерия безопасности по перепаду давления $\Delta P \leq 10$ кПа: а) 350 км/ч; б) 400 км/ч

Так, при движении поезда в тоннеле со скоростью $v_{tr}=350$ км/ч, при коэффициенте длины, определяющим наихудшие условия перепадов давления (в данном случае $\lambda=3$), для соблюдения критерия безопасности по перепаду давления $\Delta P \leq 10$ кПа следует определять граничное значение коэффициента блокирования, равное $\beta = 0,234$. В исследовании применена модель высокоскоростного поезда с $S_{tr} = 14,37$ м², что позволяет определить оптимальное значение площади поперечного сечения тоннеля $S_{tun.opt.}$ как отношение площади поперечного сечения поезда S_{tr} к коэффициенту блокирования β : таким образом, $S_{tun.opt.}$ составит 61,40 м². При движении поезда в тоннеле со скоростью $v_{tr}=400$ км/ч и аналогичных условиях следует определять граничное значение коэффициента блокирования, равное $\beta = 0,190$, таким образом, $S_{tun.opt.}$ составит 75,70 м².

Применение графических зависимостей параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях высокоскоростного движения позволяет на этапе проектирования назначить сооружению рациональные параметры с учетом основных факторов, влияющих на перепады аэродинамического давления. Такой подход определяет возможности для повышения эффективности проектирования однопутных тоннелей на ВСМ.

3.8. Основные положения методики и алгоритма прогноза аэродинамических процессов в однопутных тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях

Решение задачи по определению аэродинамических характеристик при движении поездов в однопутных тоннелях в условиях высокоскоростного движения требует комплексного подхода при рассмотрении взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд». Ввиду необходимости учета значительного числа факторов разработаны методика и алгоритм прогноза аэродинамических процессов для определения и назначения площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ.

1. Первоначальным минимальным требованием к исходным данным задачи является набор параметров объекта. Площадь поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ зависит от многих факторов, при этом отмечается, что основными определяющими остаются традиционные факторы: инженерно-геологические условия строительства и габариты подвижного состава и приближения строений. Конструктивно-технологические и объемно-планировочные решения тоннелей являются комплексными разделами при проектировании, проектирование следует вести в соответствии с нормативными требованиями, что определит конструктивные характеристики будущего сооружения. Эксплуатационные требования железнодорожной линии и параметры предполагаемого подвижного состава также являются лимитирующими в отношении скорости эксплуатации поездов.

2. Далее осуществляется переход к назначению начальных основных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд», а именно: предполагаемая скорость движения поезда, предполагаемая длина подвижного состава (или диапазон для определения наименее благоприятных значений) и площадь его поперечного сечения (миделево сечение), исходные длина и площадь поперечного сечения тоннеля. Проверка соответствия площади поперечного сечения тоннеля необходимым эксплуатационным требованиям заключается в определении лимитирующих факторов: габариты, скорость движения поездов, что определит аэродинамические показатели. Проектируемая площадь поперечного сечения тоннеля должна удовлетворять не только конструктивным и инженерно-геологическим требованиям, но и позволять безопасно пропускать подвижной состав при максимальной предполагаемой скорости движения.

При условии выполнения всех положений возможно перейти к определению критического перепада аэродинамического давления.

3. В соответствии с исходными данными осуществляется определение аэродинамических характеристик при движении поезда в однопутном тоннеле с помощью математического моделирования (методы погруженного тела, скользящих сеток): основным выходным параметром являются перепады аэродинамического давления.

4. Полученные значения сравниваются с нормативными, а именно с принятыми при проектировании критериями безопасности – как правило, ими выступают ограничения перепадов аэродинамического давления в течение любого интервала времени движения поезда в тоннеле на ВСМ. Требования UIC 779-11 определяют критерий безопасности, по которому перепад давления в 10 кПа не должен быть превышен.

5. В условиях определения аэродинамических характеристик наибольшие значения перепадов давления могут превысить критические, тогда основные параметры системы «тоннель – воздушная среда – поезд» следует уточнить. В случае, если значения перепадов давления не превышают пределов критерия безопасности, возникает область допустимых изменений с точки зрения улучшения технико-экономических характеристик. Следует установить, возможно ли уменьшение площади поперечного сечения тоннеля при соблюдении конструктивно-технологических, инженерно-геологических и эксплуатационных требований.

Таким образом, исходная задача преобразуется в поиск решений при назначении оптимальной площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ, представленный в виде алгоритма на рисунке 3.34.

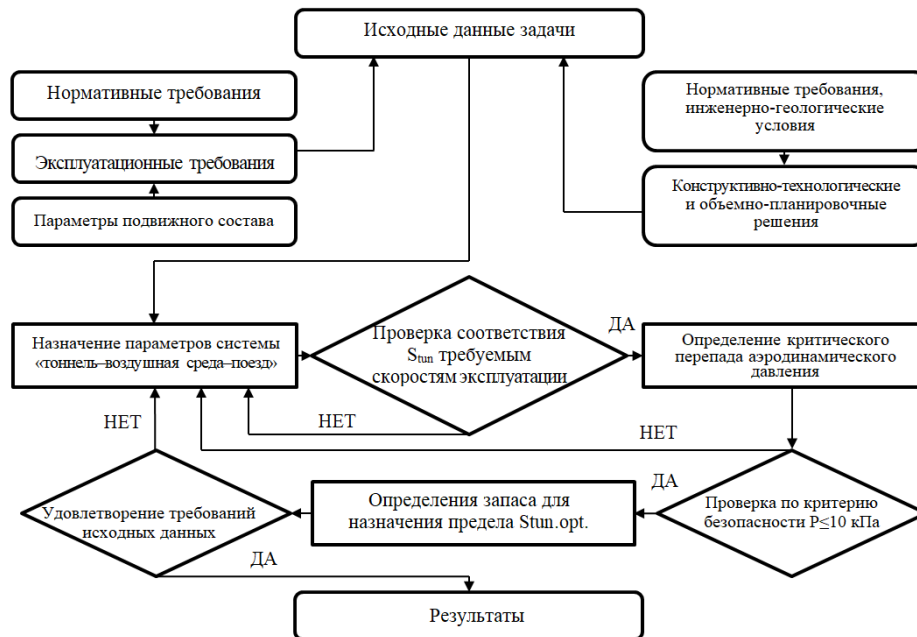


Рисунок 3.34 – Алгоритм прогноза аэродинамических процессов в однопутных тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях и назначения площади поперечного сечения однопутного тоннеля

Прогноз аэродинамических процессов при движении поездов в однопутных тоннелях в условиях скоростного и высокоскоростного движения является ключевой задачей, без решения которой невозможно перейти к определению и назначению величины поперечного сечения однопутного тоннеля.

3.9. Рекомендации по расчету аэродинамических воздействий от подвижного состава в тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях

При решении задач аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» варьирование исходных данных может стать трудозатратным процессом. Тем не менее, при проектировании рекомендуется проводить вариации условий в имитационных исследованиях с целью определения взаимосвязи выходных параметров с исходными данными. Например, следует учитывать конкретные диапазоны температур и атмосферного давления, которые, как ожидается, могут быть типичными условиями эксплуатации будущего тоннеля в месте его расположения – например, низкое давление и температуру в горных тоннелях (Алтай, Кавказ, Урал).

Амплитуда волны давления пропорциональна плотности воздуха, воздействие волн давления усиливается при низких температурах или высоком атмосферном давлении, когда воздух более плотный (например, при температуре -5°C воздух на 7,5% плотнее, чем при температуре 15°C). Если условия расположения тоннеля точно определены, предпочтительнее использовать их при моделировании в процессе проектирования: в зависимости от целей анализа могут быть выбраны либо среднегодовые значения, либо наихудшие значения (высокое давление, низкая температура).

Следует отметить, что исследование влияния локального температурно-влажностного режима тоннелей на ВСМ на аэродинамическое давление в настоящем исследовании не проводилось: такие факторы можно рассматривать в дальнейшем при совершенствовании методики и написании докторской диссертации по данному направлению. Например, экспериментально

верифицировать методику с существующим тоннелем на ВСМ с целью определения влияния начальных температур на давление, с целью анализа характерных изменений.

Начальная скорость воздушного потока в тоннеле перед прибытием поезда обычно принимается равной нулю, но может быть включена в анализ аэродинамических процессов по следующим причинам:

- сопоставление экспериментальных данных (начальная скорость воздушного потока должна быть измерена в эксперименте);
- анализ влияния нескольких поездов, проходящих тоннель последовательно (остаточный поток воздуха, вызванный одним поездом, влияет на волну давления следующего поезда);
- оценка чувствительности параметров при определении влияния воздушного потока в тоннеле, вызванного факторами окружающей среды.

Прохождение предыдущих поездов вызывает остаточный поток воздуха в тоннеле в направлении движения поездов. В однопутных тоннелях это всегда сопутствующий поток, поэтому в некоторых случаях возможно игнорирование воздушного потока от предыдущих поездов. Скорость воздушного потока, вызванная предыдущим поездом, уменьшается со временем и может быть незначительной, если между поездами большой интервал. Возможно анализировать сценарии, включающие более одного поезда, например, когда один поезд следует за другим через однопутный тоннель.

Воздушный поток в тоннеле может быть вызван разницей атмосферного давления между одним порталом тоннеля и другим. Этот эффект, как правило, сильнее в более коротких тоннелях; более длинные тоннели оказывают большее сопротивление потоку воздуха, поэтому та же разница давлений за пределами тоннеля приводит к снижению скорости воздушного потока в более длинном тоннеле.

Давление уменьшается на большей высоте, поэтому в протяженном тоннеле с однозначным уклоном давление воздуха постепенно изменяется. Когда поезд проходит через тоннель, изменение давления из-за изменения высоты добавляется к изменениям давления, вызванным волнами давления.

Имитационное моделирование в объемной постановке задачи также необходимо применять при решении подобных локальных задач (применительно к тоннельным конструкциям):

- оценка характеристик воздушного потока (давление, вызванное волнами давления, и давление от проходящего поезда) и импульсных воздействий вокруг стационарного оборудования в тоннелях, позволяющая получить более точную оценку аэродинамического давления для заданной скорости воздушного потока;

- оценка эффектов турбулентности или асимметричного аэродинамического давления в тоннеле [118];

- оценка эффектов волн давления, возникающих при прохождении поездом тоннеля нетипичной геометрии, например, при изменении площади поперечного сечения по длине тоннеля.

Все эти нагрузки следует рассматривать как усталостные нагрузки, учитывая количество циклов нагружения, ожидаемое в течение расчетного срока службы оборудования. Кроме того, предельные нагрузки могут быть рассчитаны с учетом наихудших атмосферных условий и характеристик поезда.

Тоннельное пересечение может быть дополнено включением в модель существующих поперечных сбоек для анализа воздействия волн давления при моделировании различных ситуаций движения поездов (например, поезда, въезжающие в оба тоннеля в разное время относительно друг друга), однако это потребует значительного увеличения вычислительных мощностей. При перемещении воздушных потоков из одного тоннеля в другой возникает более сложная суперпозиция полей аэродинамического давления. Качественно и количественно будут отличаться результаты в зависимости от интервала движения поездов. Если сбойки остаются открытыми во время движения поездов, либо при возникновении значительной утечки через затворы, перемещение воздуха из одного тоннеля в другой может повлечь смягчение волны давления в некоторых случаях (например, при движении поезда только в одном из тоннелей). Однако в других случаях могут возникнуть наихудшие положения экстремального давления (например, при одновременном движении поездов в тоннелях). При нормальном

режиме эксплуатации сбойки полностью закрыты во время движения поездов, что, как правило, требуется по соображениям пожарной безопасности, поэтому движения воздушных масс между тоннелями не возникает, но затворы сбоек должны выдерживать нагрузку полного давления, возникающую в результате воздействия волны давления от проходящего поезда.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Изучены причинно-следственные связи, обуславливающие закономерности изменения аэродинамического давления от различных параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд». На основе расчетно-теоретического анализа результатов моделирования аэродинамического взаимодействия системы установлены зависимости для прогнозирования аэродинамического давления в системе. Определено влияние параметров на характер и особенности аэродинамического состояния системы.

При определенном наборе параметров системы «тоннель – воздушная среда – поезд» увеличение скорости от 250 км/ч до 400 км/ч может повлечь за собой возрастание давления более чем в 2,5 раза. Площадь поперечного сечения тоннеля и коэффициент блокирования оказывают более значительное влияние при значениях менее 80-82,5 м² и более 0,1796-0,174 соответственно. Длина тоннеля и коэффициент длины влияют на значение давления неравномерно: из-за явления интерференции волн интенсивный рост и пиковые значения амплитуды, вне зависимости от значения площади поперечного сечения тоннеля, приходятся на диапазон $\lambda=2..7$, что необходимо учитывать при назначении длины высокоскоростного подвижного состава, эксплуатируемого на ВСМ. При этом с ростом величины λ изменения затухают, и аэродинамическое давление уменьшается относительно максимума, оставаясь избыточным.

Впервые установлены и обоснованы критерии оптимизации значения площади поперечного сечения однопутных тоннелей на ВСМ. Построены характерные зависимости, позволяющие определить область безопасных значений площади поперечного сечения тоннелей, а также прогнозировать

значения вероятных перепадов аэродинамического давления. На основании расчетного обоснования возможно уменьшить площадь поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ в пределах 18% без перепадов давления, превышающих критические.

Сформулирован системный подход к проектированию однопутных тоннелей на ВСМ, дающий возможность назначения оптимальной площади поперечного сечения тоннелей. Разработаны рекомендации по назначению площади поперечного сечения тоннелей с учетом аэродинамики.

Разработаны методика и алгоритм прогноза аэродинамических процессов в однопутных тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях. Назначение площади поперечного сечения однопутного тоннеля на ВСМ на основе системного подхода с учетом требований безопасности заключается в корректном определении перепадов аэродинамического давления в тоннеле на основе численного анализа.

Разработаны рекомендации по расчету аэродинамических воздействий от подвижного состава в тоннелях на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях, которые включают в себя корректный учет климатических условий при расчете аэродинамического давления. Исследование влияния локального температурно-влажностного режима тоннелей на ВСМ на аэродинамическое давление возможно рассматривать в дальнейшем при совершенствовании методики и концепции системного подхода к проектированию тоннелей на ВСМ.

Определение оптимального значения площади поперечного сечения тоннеля на ВСМ при определенных условиях становится шагом к формулировке практических рекомендаций по назначению технических характеристик однопутных тоннелей на ВСМ. Решение поставленных задач позволит увеличить эффективность высокоскоростных железнодорожных перевозок. При этом снижение затрат на строительные капиталовложения и текущее содержание тоннельного пересечения может достигать 20% при заданных технических характеристиках [78, 124, 150].

4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ОБДЕЛКИ ОДНОПУТНОГО ТОННЕЛЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

Проблема повышения аэродинамического давления при движении объектов в стесненном пространстве изучается с конца XIX начала XX веков [41, 66, 99, 109, 149, 150]. Становление исследований в экспериментальных аэродинамических трубах позволило воспроизводить процессы и явления с целью их подробного описания и изучения. С развитием железнодорожного транспорта и тоннелестроения, с повышением скорости движения поездов, актуальность стал приобретать вопрос безопасности движения в тоннелях. В частности, вопрос возникновения избыточного давления при движении поездов в тоннелях. Появились предложения о мерах его смягчения, которые развивались и модернизировались со временем, с учетом недостатков предыдущих вариантов решения проблемы избыточного давления [71].

4.1. Анализ существующих мер по снижению негативных эффектов от аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях

Повышенные требования к конструктивным решениям тоннелей на ВСМ связаны с безопасностью эксплуатации по причине избыточного аэродинамического давления, возрастающего с увеличением скоростей движения поездов. В соответствии с документом «Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»»:

«— геометрические размеры поперечного сечения и конструктивные решения тоннелей должны устанавливаться с учетом минимизации величины избыточного аэродинамического давления, возникающего при входе в тоннель и движении в нем высокоскоростного железнодорожного подвижного состава;

— при проектировании объектов инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, включающих составные части железнодорожного пути, а также при проектировании продукции, включающей элементы составных

частей железнодорожного пути, должны быть проведены специальные исследования для принятия решений по снижению колебаний аэродинамического давления в тоннелях, закрытых выемках и подземных станциях при проходе высокоскоростного железнодорожного подвижного состава с максимальными скоростями».

В соответствии с СТУ «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству», СП 453.1325800.2019 «Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства»:

«Обделка тоннелей должна иметь улучшенные аэродинамические свойства, не иметь выступающих углов, в связи с чем:

- ниши и камеры в тоннеле не устраиваются,
- трубы с подводящим кабелем питания освещения и слаботочных устройств утапливаются в тело обделки, внутренних конструкций тоннеля или путевого бетонного основания при условии соблюдения мероприятий по их герметизации,
- шкафы, проемы и ниши во внутренних конструкциях должны быть закрытыми, например, дверцами жалюзийного типа».

Совершенствование железнодорожного подвижного состава и развитие тоннелестроения подчеркнули актуальность вопросов безопасности движения поездов в тоннелях в отношении аэродинамического взаимодействия: при скоростях эксплуатации поездов 80-100 км/ч и более избыточное давление начинает существенно влиять не только на внутреннее обустройство тоннелей, но и на комфорт пассажиров и экипажа поезда [72].

Первые предложения о мерах снижения величины избыточного аэродинамического давления при движении поезда в тоннеле посредством изменений в конструктивных и объемно-планировочных решениях возникли при выявлении проблемы в процессе эксплуатации протяженных тоннелей на ВСМ.

Эти предложения строились на опыте эксплуатации и носили интуитивный характер. Одним из первых способов достижения цели являлось увеличение площади поперечного сечения тоннеля. Избыток площади влияет на уменьшение сопротивления движению, снижает интенсивность перепадов давления и скорости движения воздушных потоков [155, 156]. Это решение не является рациональным, поскольку невысока его эффективность (значительное увеличение поперечного сечения – до 75% непропорциональное уменьшению аэродинамического давления – до 10–15%) при значительных материальных затратах: увеличение объемов разработки грунта, продолжительности сроков строительства (рисунок 4.1).

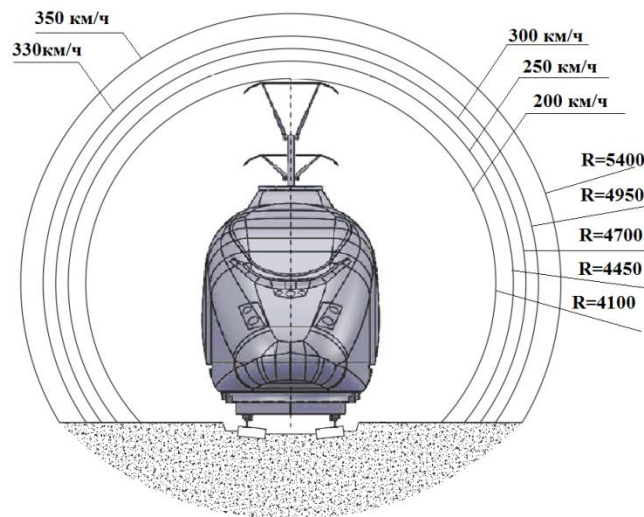


Рисунок 4.1 – Схема необходимого увеличения площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поезда

В последующем решения развивались в направлении эффективного применения сооружений, входящей в состав тоннельных пересечений, но свободной от движения поездов: такой как вентиляционные шахты, поперечные сбойки, вспомогательные (сервисные тоннели), штольни и дополнительные камеры [81, 123]. Вентиляционные шахты, как способ смягчения аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях, показали эффект уменьшения колебаний до 15% как с принудительной вентиляцией, так и без неё. Основным достоинством является необходимость сооружения стволов при строительстве и эксплуатации большинства

тоннельных пересечений. При помощи модернизируемых систем вентиляции возможно комплексно организовать принудительный перенос воздушных масс. Недостатки указанных мероприятий заключаются в дорогостоящих эксплуатационных системах, а также горизонтальных, зачастую протяженных штольнях между железнодорожным тоннелем и шахтой, значительно повышающих сопротивление, что влечет снижение эффективности в борьбе с избыточным аэродинамическим давлением (рисунки 4.2, 4.3) [157].

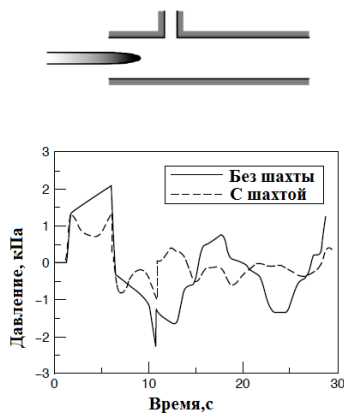


Рисунок 4.2 – Влияние вентиляционной шахты на перепады давления в тоннеле

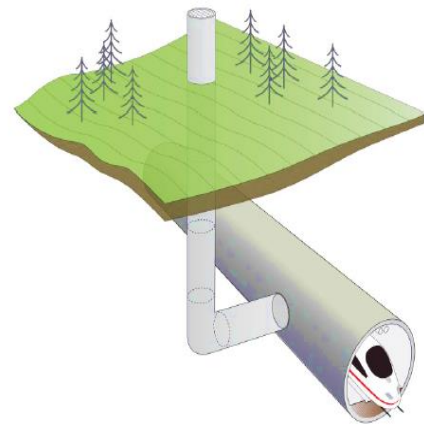


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема вентиляционной шахты с горизонтальной штольней

Сервисные тоннели оказались менее эффективны из-за меньшего поперечного сечения и большего возрастания сопротивления, так как воздушные массы возможно удалять из железнодорожного тоннеля только через поперечные сбойки. Тогда как сами поперечные сбойки между двух параллельных однопутных тоннелей при отсутствии герметичных затворов позволяют снизить давление не более, чем на 10–15%, за счет выводить избыточные воздушные массы в соседний тоннель (рисунок 4.4, [123]). Однако указанное решение неэффективно при встречном параллельном движении поездов, возможно ухудшение аэродинамических условий в тоннеле, трудоемко при сооружении, и также снижает функциональность самих сбоек, а отсутствие герметичных дверей противоречит нормам пожарной безопасности.

С целью улучшения технико-экономических показателей и уменьшения сроков строительства в 80-90-ые годы был предложен вариант двухпутного тоннеля с перфорированной стеной-перегородкой. Данный способ позволяет снижать давление за счет уменьшения его интенсивности (площадь поперечного сечения тоннеля больше, чем для однопутного), переноса давления воздушных масс в свободную площадь тоннеля, однако при встречном движении поездов площадь поперечного сечения оказывается полностью занята и сокращена частью перфорированной стены (рисунок 4.5, [123]), при этом давление может значительно возрастать. Эффективность такого решения в снижении аэродинамического давления невысока, тогда как вопрос безопасности эксплуатации остается крайне спорным: в случае схода поезда с рельс оба состава в тоннеле будут изолированы друг от друга, тогда как в случае наступления чрезвычайной ситуации, например, пожара, оба поезда находятся в едином пространстве, что препятствует бесперебойной эксплуатации магистрали: перфорированная стена не разделяет воздушные потоки друг от друга.

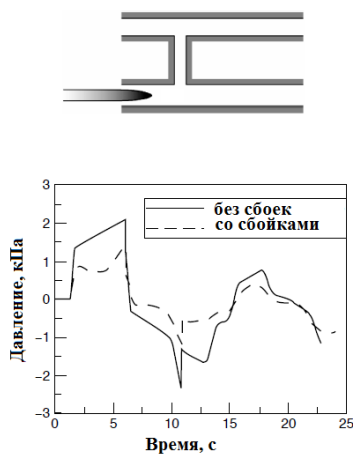


Рисунок 4.4 – Влияние поперечной сбойки на перепады давления в тоннеле

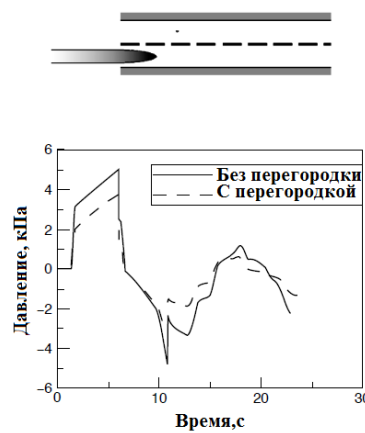


Рисунок 4.5 – Влияние перфорированной стены на перепады давления в тоннеле

В результате проведение научных исследований проблематики избыточного давления в тоннелях способствовало дальнейшей модернизации способов его снижения. В результате было разработано конструктивное решение в виде противодутьевых поперечных сбоек, не связанных с сервисным тоннелем.

Примером такого решения является протяженный (50450 м, скорости эксплуатации поездов до 200 км/ч) Евротоннель (рисунок 4.6) [64, 72, 138]. Математическое моделирование и дальнейшая эксплуатация тоннеля подтвердили эффективность в снижении аэродинамического давления до 15–18%, однако такой способ повышает сроки строительства и его стоимость на 15–20% из-за необходимости сооружения дополнительных конструкций, связанных с раскрытием постоянной обделки тоннеля.

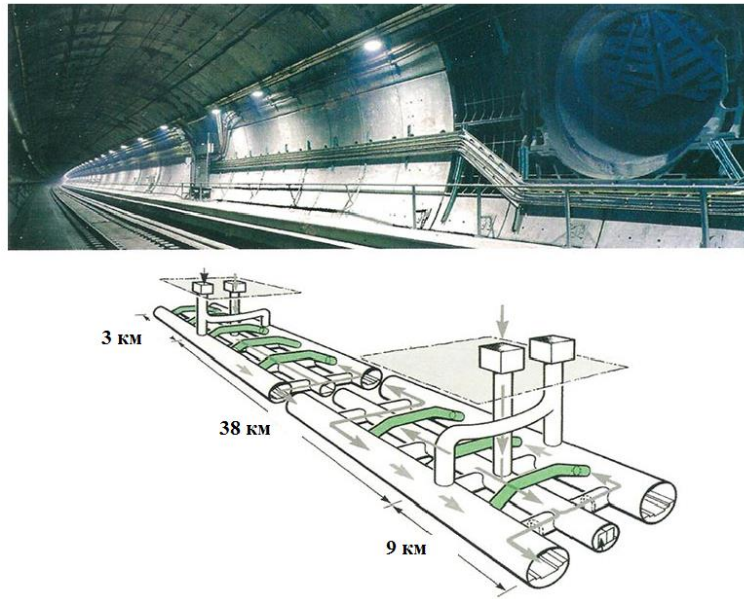


Рисунок 4.6 – Схема противодутьевых поперечных сбоек в Евротоннеле

В 90-ые годы в Японии был разработан и исследован конструктивный вариант однопутного тоннеля с дополнительными разгружающими камерами (рисунки 4.7 и 4.8). Решение показало эффективность (до 25%), хотя в расчетах принимался ряд допущений: принято ограничение скорости движения поезда в тоннеле до 230 км/ч, не были исследованы влияние длины тоннеля, шероховатость поверхностей. Проблема была решена только теоретически. При всех недочетах указанный способ до настоящего времени являлся наиболее эффективным в решении вопроса избыточного давления внутри тоннеля при движении поезда со скоростями более 200 км/ч [143]. Однако методика снижения давления не дает возможность решить проблемы при скорости движения 250 км/ч.

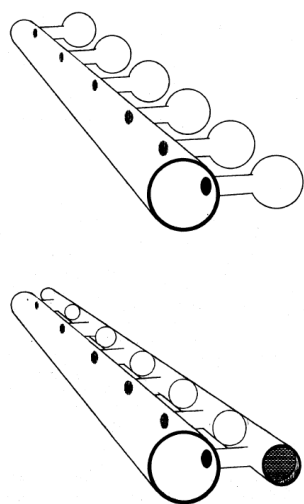


Рисунок 4.7 – Тоннель с разгружающими камерами

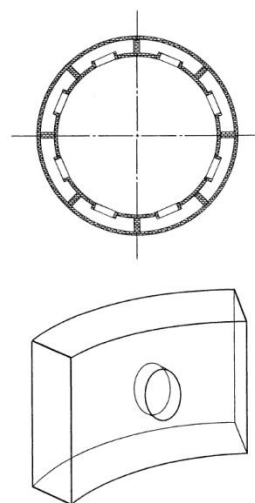


Рисунок 4.8 – Конструкция тоннеля с резонаторами Хельмгольца

Конструкция ВСП в тоннеле влияет на распространение волн давления по его длине и на волны микродавления (рисунок 4.9). «Балластный эффект» тщательно изучен, в особенности в протяженных тоннелях: выбор балластной конструкции ВСП может являться эффективной мерой смягчения волн микродавления [104].

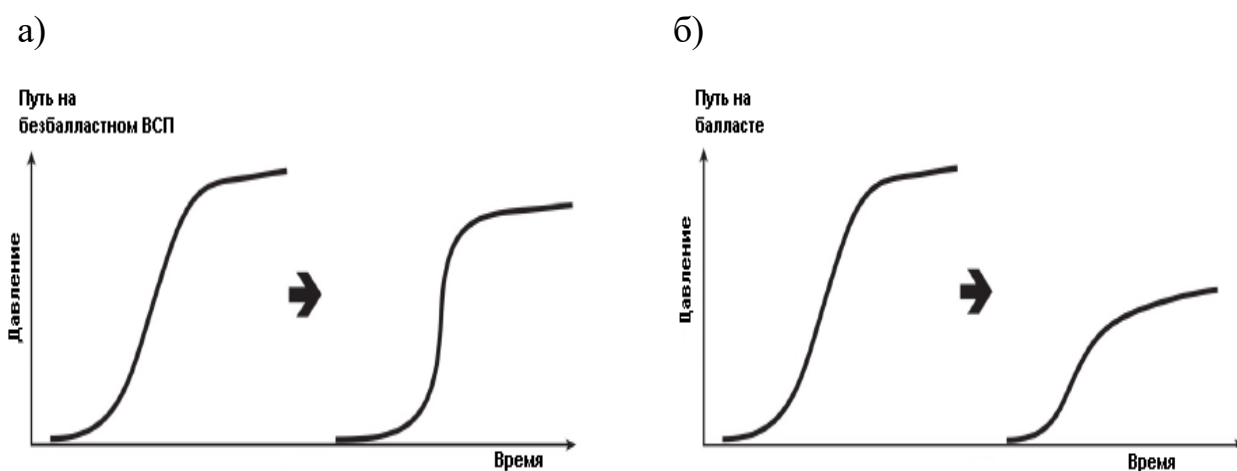


Рисунок 4.9 – График изменения давления при образовании волны давления:
а) при безбалластном ВСП; б) при балластном ВСП

Однако в коротких тоннелях времени распространения волн недостаточно для проявления положительного «балластного эффекта», а при высоких скоростях движения поезда в протяженном тоннеле с балластной конструкцией ВСП амплитуда давления может оказаться настолько значительной, что инерционные воздушные потоки преодолеют «балластный эффект» [77]. Общемировая

практика и существующие нормативные документы рекомендуют применение пути на жестком основании без балласта.

Известны исследования типов покрытия внутренней поверхности тоннеля звукопоглощающими материалами, влияние способов и материалов на распространение волн давления, в основном волн микродавления [132]. Эффект таких способов незначительный при существенных затратах, однако эволюция решений в данном направлении признана перспективной.

В ходе анализа известных решений была выявлена потребность разработке конструктивного решения для снижения избыточного аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» с удовлетворительными технико-экономическими показателями для протяженной длины тоннеля на ВСМ.

4.2. Разработка конструктивного решения обделки однопутного тоннеля на ВСМ

Предложение о компенсационных мерах для снижения избыточного аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» при скоростях движения до 400 км/ч заключается в разработке конструктивного решения обделки однопутного тоннеля кругового очертания, сооружаемого щитовым способом. Предложенный конструктив, зарегистрированный авторским коллективом патентом на изобретение РФ 2683841 от 02.04.2019 [42], обладает преимущественными особенностями по сравнению с традиционными способами: позволяет смягчать проявления перепадов давления, минимизировать риск наступления предельной амплитуды аэродинамического давления [48]. Особенность решения заключается в сквозных каналах, расположенных в блоках тоннельной обделки, позволяющих компенсировать перепады давления и волны сжатия, перераспределяя их по длине тоннеля при движении поезда (рисунок 4.10).

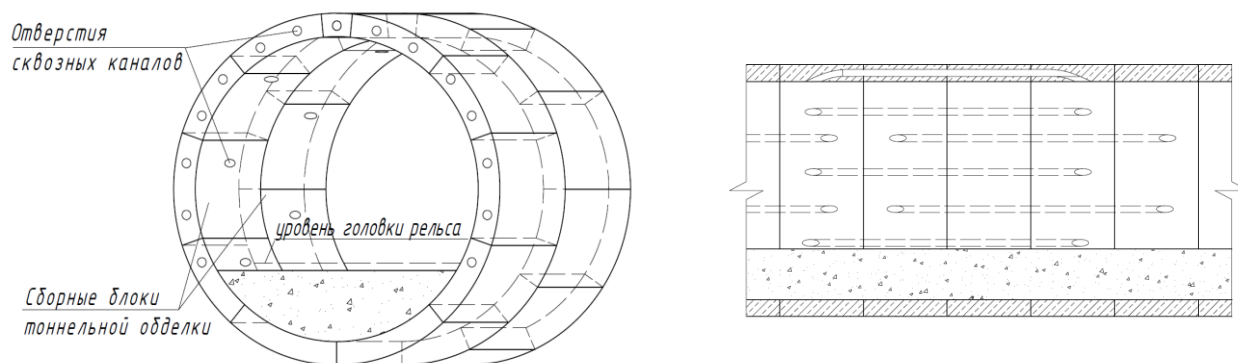


Рисунок 4.10 – Запатентованное конструктивное решение обделки тоннеля на высокоскоростной магистрали, РФ 2683841

Предлагаемый способ регуляции избыточного давления, снижения его интенсивности и амплитуды, управления аэродинамическим воздействием заключается в следующем: встроенные в постоянную конструкцию тоннеля сквозные каналы, пронизывающие обделку тоннеля по длине, позволяют перераспределять избыточные воздушные массы из зоны высокого давления (область сжатия) в зону более низкого давления (область разрежения) без принудительной вентиляции [71].

Гипотеза состоит в физическом процессе переноса воздушных масс из области сжатой зоны (носовая часть) в область разрежения (головная часть, хвостовая часть) поезда, что способствует уменьшению интенсивности давления. Под действием высокого давления воздух перемещается в область более низкого давления.

Известно, что гидравлическое сопротивление повышается с уменьшением свободной площади и увеличением длины канала, что и происходит при движении поезда в тоннеле. Сквозные каналы в обделке должны быть устроены таким образом, чтобы возникла возможность переноса воздушных масс под давлением. Одним из вопросов является сопротивление непосредственно в самих каналах (рисунок 4.11): вопрос тщательного исследования эффективных геометрических и механических параметров такой конструкции тоннельной обделки является актуальным.

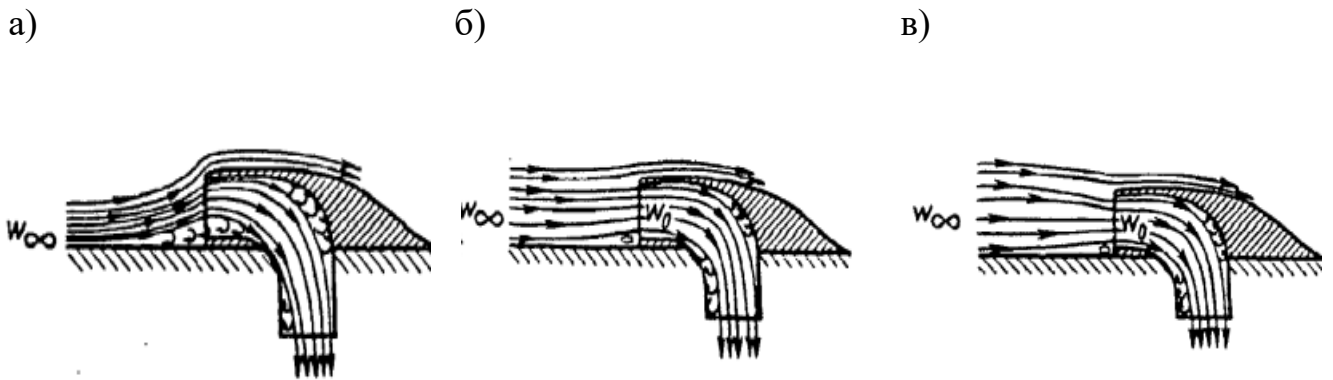


Рисунок 4.11 – Различные варианты входа потока в патрубок: а) при малых коэффициентах расхода (существенно меньше единицы) б) при средних коэффициентах расхода в) при больших коэффициентах расхода ≥ 1 [18]

Техническое решение применимо для нового строительства, обладает улучшенными свойствами и технико-экономическими показателями (меняется собственно конструкция обделки тоннеля без необходимости во вспомогательных обустройствах и сооружениях, снижается объем разработки грунта) [71].

Указанный способ обладает значительными преимуществами в сравнении с существующими решениями: относительная дешевизна и возможность получения экономии при строительстве протяженных тоннелей за счет отсутствия дополнительных выработок и объемов разработки грунта, удобство эксплуатации и сокращение трудозатрат [50]. При снижении давления возникает возможность сокращения площади поперечного сечения тоннеля с сохранением установленной ранее интенсивности перепадов давления, что приведет к сокращению затрат. В основу дальнейших исследований для усовершенствования конструктивных решений обделки тоннеля в условиях скоростного и высокоскоростного движения поездов положено математическое моделирование с учетом аэродинамических явлений по разработанной и описанной в предыдущих главах методике.

4.3. Обоснование эффективности конструктивного решения обделки однопутного тоннеля

4.3.1. Исследование аэродинамических процессов в однопутном тоннеле с конструктивным решением обделки на ВСМ

Целью настоящего раздела является обоснование эффективности работы конструктивного решения тоннельной обделки со сквозными каналами с учетом аэродинамических процессов, определение геометрических параметров обделки со сквозными каналами. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- определение сопротивления каналов различной геометрии;
- определение геометрических параметров каналов, понижающих давление сжатой области;
- определение геометрических параметров каналов, при которых воздушные потоки перераспределяются в зону разрежения.

При этом параметры моделирования системы «тоннель – воздушная среда – поезд» приняты по наимудшим сочетаниям параметров с точки зрения аэродинамики, т.е. критические по длине и площади поперечного сечения:

- коэффициент длины $\lambda=3..7$;
- площадь поперечного сечения тоннеля $S=55..75 \text{ м}^2$ ($\beta=0,1916..0,261$);
- скорость движения поезда $v=250..400 \text{ км/ч}$.

Варьируемые геометрические характеристики:

- поперечное сечение канала;
- положение начала канала;
- длина канала;
- угол входа канала.

С целью исследования взаимодействия поезда при прохождении однопутного тоннеля произведена серия экспериментов. Исследование включает в себя моделирование в CFD комплексе прохождения поездом тоннеля в виртуальной герметичной среде при различных начальных условиях: механических и геометрических параметрах системы – скорости движения

поезда v , (км/ч), площади поперечного сечения S_{tun} , (м^2) и длины тоннеля L , (м), приведенные к безразмерным коэффициентам блокирования β и длины λ .

В качестве условий были заданы следующие параметры окружающей среды: температура (T) 293 К, давление (p) 101325 Па, плотность (ρ) 1,204 кг/м³, кинематическая вязкость (ν) $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, динамическая вязкость (η) 18,1 мПа·с. Принята модель *SST* турбулентности.

Математическая модель представляет собой апробированную модель поезда типа ЭВС «Сапсан» и универсальную модель тоннеля (с возможностью широкого варьирования геометрии). Однопутный железнодорожный тоннель на ВСМ, сооружаемый щитовым способом, представлен в виде конструкции кругового очертания с дополнительными воздуховодными каналами. Тоннель моделируется с жестким безбалластным основанием, с целью анализа аэродинамического давления в тоннеле с модернизированной конструкцией обделки внутреннее оборудование и обустройство минимизировано.

Расчет производится поэтапно в нестационарной постановке согласно разработанной методике расчета аэродинамического давления в тоннелях на ВСМ, сетка разбита на подвижные и неподвижные элементы. Основным изменяемым параметром входных данных является скорость движения поезда (250-400 км/ч), выходные параметры – амплитуды аэродинамического давления, скорости движения воздушных масс, траектории воздушных потоков.

В результате решения задачи получены численные значения и эпюры перепадов аэродинамического давления в условиях высокоскоростного движения поездов, а также траектории воздушного потока. Верификационные расчеты и оценка результатов показали их воспроизводимость. Следует отметить, что вначале осуществлялось моделирование и расчет кругового очертания новой конструкции тоннеля с воздуховодными каналами внутри обделки с варьируемыми геометрическими параметрами. Моделирование было выполнено параметрически, с учетом изменения разбивки подвижных сеток, варьируемая геометрия сквозных каналов представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Варьируемые параметры исследования сквозных каналов

Варьируемый параметр	Диапазон варьирования	Шаг варьирования
- количество каналов в сечении	10-30	3
- диаметр канала, м/ поперечное сечение канала, м ²	0,05/0,00196 – 0,15/0,01767	0,02
- длина канала, м	10-100	10
- угол входа канала, °	5-30	5

4.3.2. Анализ результатов исследования аэродинамических процессов

Основной задачей являлось установление наиболее эффективной конфигурации каналов. Гидравлические потери, обусловленные проявлением вязкостных сил, определялись с учетом отсутствия местных сопротивлений (сечение канала постоянно по длине). Потери на трение при течении в прямой круглой трубе зависят не только от относительной шероховатости стенок, но и от числа Рейнольдса. Течение в каналах оказывается смешанным, либо турбулентным, что может при определенных неблагоприятных условиях значительно влиять на рост сопротивления. Шероховатость каналов с учетом материала задана в соответствии с ГОСТ 8.586.1-2005 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств». Были получены гидравлические сопротивления, определяющие потери при движении воздушных масс в каналах из области сжатия в область разрежения, определены диапазоны геометрических параметров, для которых возможен эффективный перенос воздушных масс.

Полученные в ходе экспериментов результирующие эпюры построены в обобщенном виде, а результаты сравнения численных значений аэродинамического давления и эффективности снижения давления сведены в таблицы 4.2, 4.3. По результатам сравнения выполнен анализ конструктивных вариантов и принят для дальнейшего моделирования наиболее оптимальный. На графиках (рисунки 4.12-4.13) показаны сравнительные величины отношения аэродинамического давления при прохождении поезда по однопутному тоннелю с обделкой без сквозных каналов и с каналами при различной скорости движения. Графики иллюстрируют

эффективные диапазоны варьируемых исходных параметров сквозных каналов.

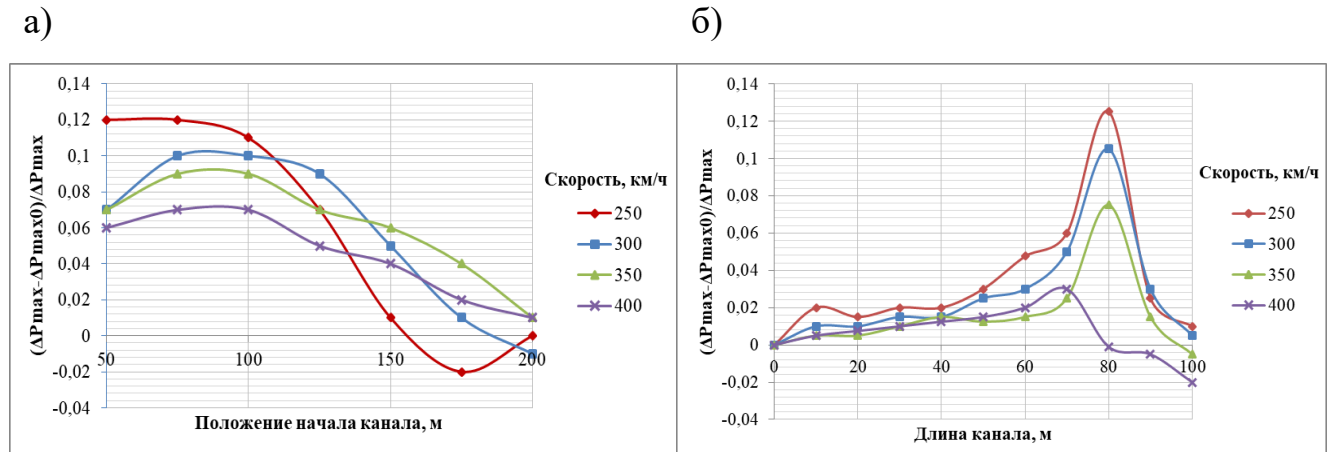


Рисунок 4.12 – Графики зависимости относительного давления при различных скоростях движения поезда: а) от положения начала канала; б) от длины канала

Было показано, что эффект снижения давления наблюдается при длине канала от 40 м, падает с увеличением длины канала до 100 м из-за возникающих потерь на трение по длине. Кроме того, каналы, начинающиеся практически у портала тоннеля (до 100 м) показывают больший эффект снижения давления, чем каналы, начинающиеся дальше от портала (более 100 м). Такое влияние обусловлено интенсивным и мгновенным изменением аэродинамического сопротивления движению поезда при его входе в тоннель: воздушные массы разгоняются, их кинетическая энергия слишком велика, поэтому более быстрая компенсация давления (близкое расположение каналов к началу тоннеля) показывает лучший эффект в смягчении перепадов как статического, так и динамического давлений.

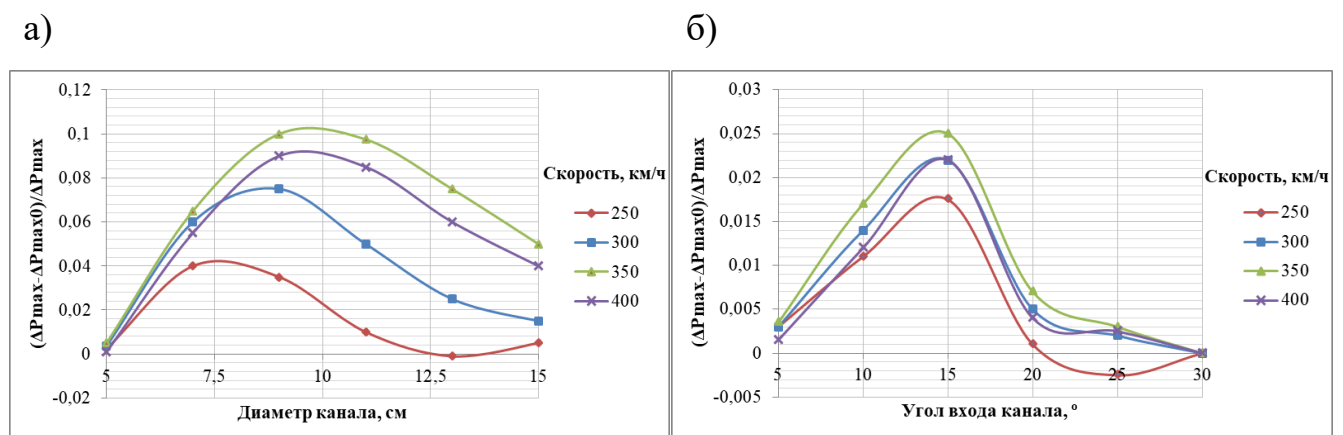


Рисунок 4.13 – Графики зависимости относительного давления при различных скоростях движения поезда: а) от диаметра канала; б) от угла входа канала

На графике 4.13 показаны зависимости изменения относительного значения аэродинамического давления при разных значениях площади поперечного сечения каналов. Разница давлений области сжатия и разрежения слишком мала вначале, чтобы воздушные массы могли через каналы перераспределиться в другую зону, поэтому важна минимальная площадь поперечного сечения канала, эффективная для переноса воздушных масс. Энергия воздушных масс квадратично зависит от скорости, поэтому эффективные значения площадей отверстий отличаются в диапазоне скоростей движения поездов. Так для скоростей движения от 250 км/ч эффективность показывают каналы диаметром не менее 7 см, с ростом скоростей эффективный диаметр увеличивается до 11–12 см. К определенной скорости движения поезда (250–300 км/ч), особенно при конкретных значениях коэффициентов длины и блокирования (наименее благоприятные сочетания, например, при $\lambda=3..4$), эффективность каналов диаметром до 15 см начинает падать и колеблется в уровне 0,5–1%. Однако в тех условиях, которые способствовали эффекту снижения интенсивности аэродинамического давления в тоннеле, уменьшение составило до 10,5% при скорости движения поезда 350 км/ч.

При скорости движения поезда 250–350 км/ч каналы могут быть эффективны при длине до 100 м включительно, при скорости до 400 км/ч эффективность подтверждена при длине до 80 м. Эффективный диаметр начинается от 50 мм для всего диапазона скоростей, однако при 400 км/ч при длине канала более 20 м сопротивление становится слишком значительным для диаметра 50 мм. Например, диаметр каналов 110 мм будет эффективным для переноса избыточных воздушных масс: при 250 км/ч до 100 м включительно, при 300 км/ч до 85 м, при 350 км/ч до 65 м, при 400 км/ч до 45 м.

Количественно при площади сечения тоннеля 55 м² эффект снижения аэродинамического давления проявляется не менее, чем при 12 отверстиях сквозных каналов. С ростом значения площади поперечного сечения тоннеля аэродинамическое давление в самом тоннеле уменьшается, эффект от сквозных

каналов увеличивается в пределах 12–25 отверстий, затем остается стабильным, несмотря на увеличение количества отверстий (например, до 30 каналов).

Угол входа сквозных каналов в обделке напрямую связан с углом атаки воздушных потоков, и для выявления эффективного угла требуется провести детальные комплексные исследования пограничного слоя в зоне начала отверстий в обделке тоннеля. Было выявлено, что воздушным массам свойственно двигаться параллельно обделке, не вовлекаясь в каналы при определенных углах и высоких скоростях (более 350 км/ч). Однако при варьировании показателей было выявлено, что угол входа каналов в меньшей степени влиял на снижение давления при более низких скоростях (250 км/ч). Эффективный диапазон находится в пределах 8-17°, это заключается именно в принципиальной возможности движения турбулентных воздушных масс при входе в канал под определенным углом (рисунок 4.14). Спиралевидный вариант сечения каналов (внутренний контур поверхности каналов) может способствовать более эффективному перетеканию воздушных потоков за счет повторения своей формой траектории движения потоков, то есть возможно исследовать направленное управляемое движение воздушных потоков в каналах.

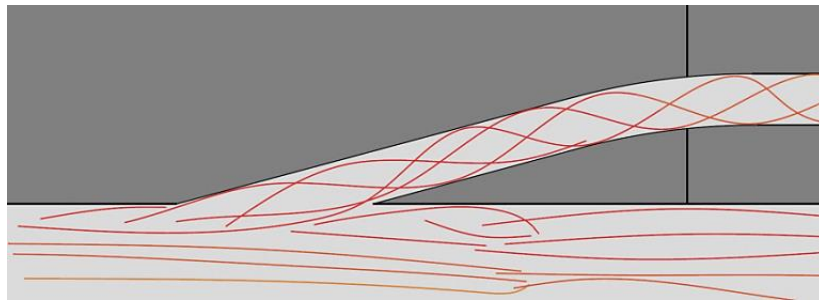


Рисунок 4.14 – Траектории спиралевидных воздушных потоков на контакте «обделка-канал» (при скорости движения поезда 350 км/ч, сечение по каналу)

Результаты моделирования конструктивного решения обделки были сравнены с аналогичными по геометрическим и механическим характеристикам системы «тоннель – воздушная среда – поезд» расчетными вариантами из предыдущих глав исследования.

Сравнение производилось по идентичным параметрам скорости поезда, площади поперечного сечения и длины тоннелей конструктивных вариантов без

отверстий (исследования 2 главы) и с отверстиями. Значения для диапазона скорости 250-400 км/ч с шагом 50 км/ч при наихудших ($\lambda=5$) и граничных условиях ($S=55 \text{ м}^2$ и $S=75 \text{ м}^2$, $\beta=0,1916..0,261$), приведены в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Результаты исследования амплитуды избыточного аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле

Параметр	Амплитуда избыточного аэродинамического давления, %/Па			
	$\lambda=L_{\text{тон}}/L_{\text{пс}}=5$			
Коэффициент длины, б/р	250		300	
Скорость движения поезда, км/ч	250		300	
Площадь поперечного сечения тоннеля, м ²	55	75	55	75
Конструкция тоннельной обделки без каналов	100%/5383,50	100%3652,05	100%/7784,25	100%5291,35
Конструкция тоннельной обделки с каналами	94%5060,50	95%/3469,45	89%6927,98	92,5%4894,50

Таблица 4.3 – Результаты исследования амплитуды избыточного аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле

Параметр	Амплитуда избыточного аэродинамического давления, %/Па			
	$\lambda=L_{\text{тон}}/L_{\text{пс}}=5$			
Коэффициент длины, б/р	350		400	
Скорость движения поезда, км/ч	350		400	
Площадь поперечного сечения тоннеля, м ²	55	75	55	75
Конструкция тоннельной обделки без каналов	100%/10200,0	100%7060,8	100%/12936,0	100%9288,0
Конструкция тоннельной обделки с каналами	90,5%9231,0	87,5%/6178,2	93%12030,48	91,5%8498,52

При коэффициенте блокирования от 0,1916 до 0,261 критическое давление в тоннелях с коэффициентом длины 5 возможно смягчить до 12,5%, а в тоннелях с коэффициентом длины до 7 отмечается эффект снижения давления до 10% (рисунок 4.15 [71]).

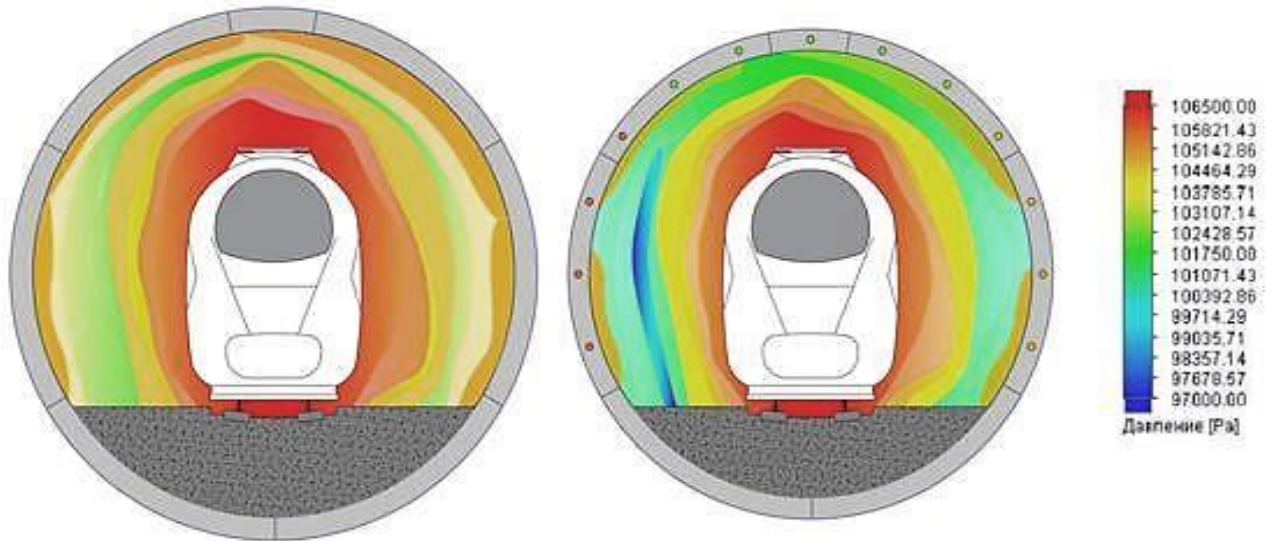


Рисунок 4.15 – Сравнение эпюр аэродинамического давления при прохождении поездом тоннеля со скоростью 350 км/ч (при $\lambda=5$) в тоннеле без сквозных каналов и со сквозными каналами

Интенсивность перепадов незначительно (менее 5%) изменяется по длине тоннеля, однако для протяженных тоннелей это изменение носит существенный характер из-за продолжительности аэродинамического воздействия. В поперечном сечении тоннеля давление носит менее пульсационный характер, однако оказывает неравномерное (несимметричное) воздействие на обделку тоннеля – это связано в первую очередь с турбулентными завихрениями, а также наложением волн, образующих сложное по траектории волновое поле вокруг движущегося поезда. Наиболее интенсивным оказывается воздействие на обделку в уровне верхнего контура и нижнего контура носовой и хвостовой частей поезда, где возникает срыв потоков.

На рисунке 4.16 показана сравнительная эпюра изолиний давления при движении поезда со скоростью 300-400 км/ч в тоннеле без сквозных каналов и со сквозными каналами: она отражает характерные зоны уменьшения интенсивности давления. На рисунке 4.15 эпюра представляет собой сравнение двух круговых сечений – площадь сечения первого варианта при внутреннем диаметре 10200 мм (без сквозных каналов) больше второго варианта при внутреннем диаметре 9400 мм (со сквозными каналами) на 16%. При этом

критерий безопасного давления в 10 кПа на скорости до 350 км/ч обеспечен. Таким образом, даже при улучшенном режиме эксплуатации по аэродинамическим воздействиям, вариант конструкции со сквозными каналами может позволить сократить площадь поперечного сечения на 16% с учетом критериев комфорта и безопасности пассажиров. Это значительная величина, учитывая протяженность тоннелей на ВСМ, что дает возможность получения улучшенных технико-экономических характеристик тоннеля [71]. С возрастанием скорости движения эффект от каналов проявляется более значительно, так как позволяет рационально распределять избыточное давление воздушных масс (происходит уменьшение давления до 10-15%).

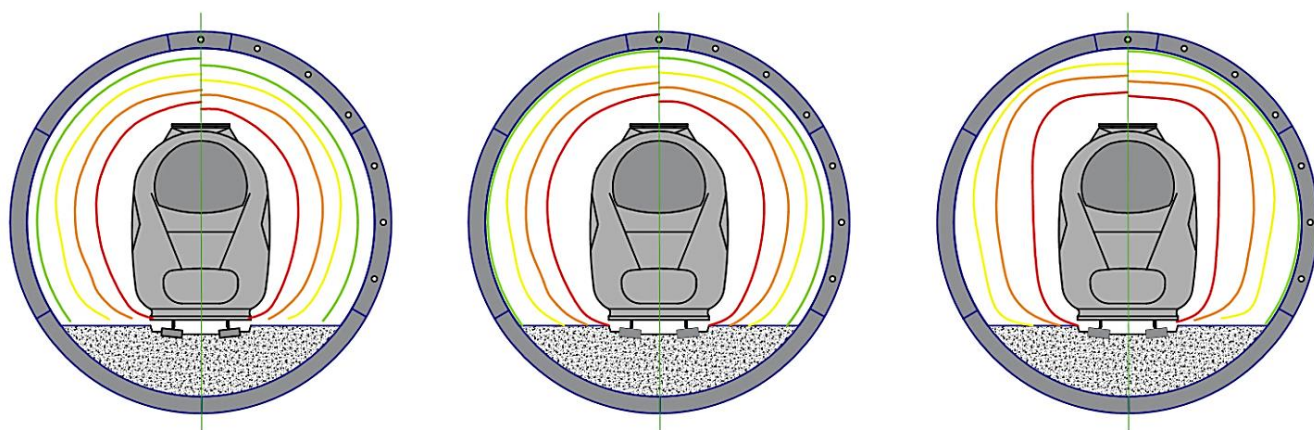


Рисунок 4.16 – Изолинии аэродинамического давления при прохождении поездом тоннеля со скоростью 300-400 км/ч ($\beta=0,225$, $\lambda=5$)

Моделирование позволило обосновать эффективность технического решения, получить подтверждение гипотезы о перераспределении давления в воздушных каналах: исследованы геометрические параметры каналов (площадь поперечного сечения каналов, угол отклонения, длина и длина каналов), получены эффективные диапазоны величин. Сопоставлены возможные аэродинамические проявления по длине тоннеля: показано положительное влияние каналов на перепады давления в разных точках по длине тоннеля, снижение амплитуды давления до 12,5%. В связи с увеличением объема для движения воздушных масс в тоннеле главным преимуществом технического решения является возможность уменьшения площади поперечного сечения тоннеля в сравнении с вариантом без сквозных каналов, что приводит к

возможности уменьшения площади поперечного сечения проходческого оборудования [71]. Подобные обстоятельства влекут за собой уменьшение стоимости строительства, а поскольку тоннели на ВСМ, как правило, значительно превышают по длине тоннели на обычных магистралях, то положительный технико-экономический эффект будет возрастать с увеличением длины тоннеля. Кроме того, понижается аэродинамическое сопротивление движению поезда, что может существенно влиять на экономические показатели затрат на электроэнергию при прохождении подвижного состава.

4.4. Рекомендации по конструктивному решению обделки однопутного тоннеля на ВСМ

Сооружение тоннелей на ВСМ щитовым способом с конструктивным решением обделки, учитывающим аэродинамические особенности, позволит получить рациональное круговое очертание поперечного сечения тоннеля, способное уменьшать интенсивность аэродинамических воздействий, возникающих при скоростном и высокоскоростном движении поездов до 400 км/ч. Соблюдение требований безопасности – ограничение аэродинамического давления в 10 кПа возможно обеспечить с запасом.

Воздуховодные каналы могут ослабить конструкцию, сокращая объем железобетона в блоках обделки, поэтому с точки зрения напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки необходимо учитывать дополнительно уменьшение толщины сечения и моментов инерции, снижение жесткости блоков. Мерами, направленными на сохранение прочностных характеристик обделки, могут быть эквивалентное увеличение толщины сечения, дополнительное армирование блоков, применение фибробетонов при изготовлении блоков обделки. Для определения разницы характеристик тоннельных обделок со сквозными каналами и без них был осуществлен прочностной расчет в плоской постановке задачи, позволивший получить эпюры внутренних усилий, представленные на рисунке 4.17.

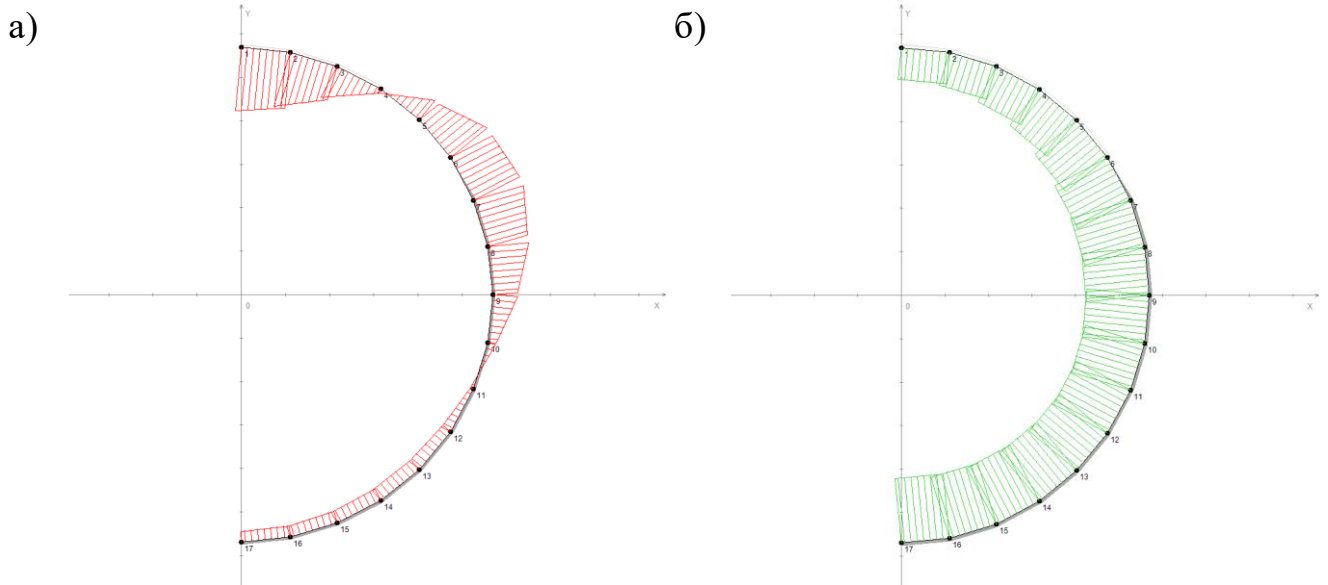


Рисунок 4.17 – Эпюры внутренних усилий для обделки диаметром 10,85 м:

а) эпюра изгибающих моментов; б) эпюра продольных сил

Сравнение результатов расчетов для колец обделок внутренним диаметром 9,00 м, толщина 0,45 м (соответствует площади поперечного сечения тоннеля 55,17 м²) и диаметром 10,85 м, толщина 0,55 м (соответствует площади поперечного сечения тоннеля 75,06 м²) со сквозными каналами диаметром 0,1 м и без них продемонстрировало разницу в значениях максимальных изгибающих моментов от 2,1 до 3,9%, продольных сил – 1,7–3,2% соответственно. Эквивалентное увеличение толщины сечения на диаметр сквозного канала в данном случае может привести к перерасходу материала и снижению технико-экономических показателей, поэтому рекомендуется рассмотреть возможность достижения требуемых прочностных характеристик другими способами, для чего следует более подробно исследовать напряженно-деформированное состояние обделки однопутного тоннеля на ВСМ со сквозными каналами.

Новый модернизированный вариант конструктивно-технологического решения тоннельной обделки открывает возможность получения улучшенных технико-экономических и эксплуатационных показателей, что позволит уменьшить стоимость строительства и эксплуатации нового тоннеля, обеспечив при этом требуемые провозную способность и скорость движения поездов (рисунок 4.18).

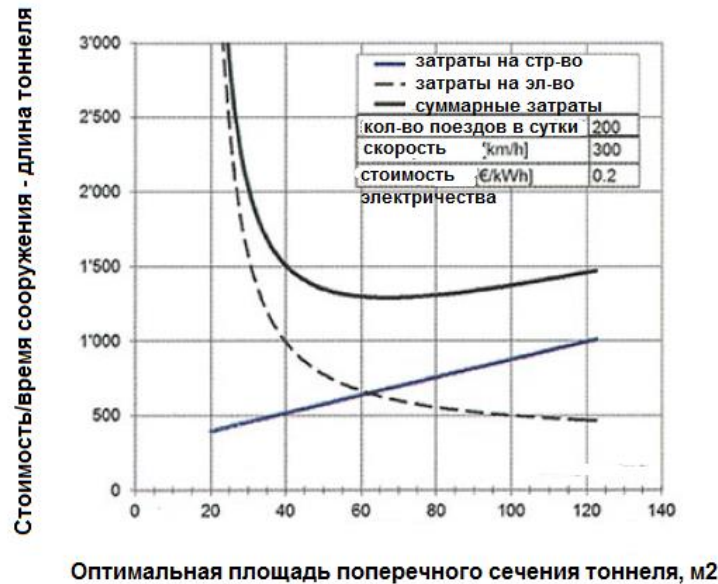


Рисунок 4.18 – График обобщенных технико-экономических показателей в зависимости от оптимальной площади поперечного сечения тоннеля [138]

Анализ результатов расчета нового конструктивного решения обделки однопутного железнодорожного тоннеля показал его эффективность в решении задачи снижения аэродинамического давления в тоннеле. Сравнение результатов расчетов обосновывает положительный технико-экономический эффект предлагаемого решения. Влияние площади свободного поперечного сечения на инвестиционные затраты и эксплуатационные затраты на тяговую мощность, что указывает на то, что для заданных граничных условий могут быть определены оптимальные размеры тоннеля.

Исследование продемонстрировало эффект снижения избыточного давления до 12,5%, что позволяет снизить площадь поперечного сечения тоннеля при сохранении прежней интенсивности перепадов давления, а значит – при соблюдении безопасности пассажиров и персонала.

Перспективой исследования является определение несущей способности обделки предлагаемого конструктивного решения в различных инженерно-геологических условиях, характеристик применяемых материалов для сквозных каналов. Также перспективным является определение особенностей внутренней геометрии каналов и структура их поверхности: шероховатость и форма, в частности рассмотрение варианта спиралевидного сечения каналов, которое

может способствовать более эффективному и интенсивному переносу воздушных потоков за счет повторения своей формой траектории движения потоков. Конструктивное решение обладает значительным потенциалом и может быть применено при проектировании и строительстве для дальнейшей эффективной эксплуатации перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий: Ростов–Адлер, Казань–Екатеринбург.

Техническое решение носит рекомендательный характер для применения в проектировании, строительстве и эксплуатации тоннелей на ВСМ и должно быть предварительно подтверждено трехмерными численными расчетами.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Разработаны мероприятия по снижению аэродинамического давления в однопутном тоннеле на высокоскоростных магистралях – конструктивное решение обделки однопутного тоннеля на ВСМ в соавторстве с научным руководителем В.Н. Кавказским.

Проведено численное моделирование аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» с разработанным конструктивным решением обделки однопутного тоннеля на основе разработанной методики. Обоснована его эффективность в снижении аэродинамического давления в однопутных тоннелях в условиях скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Показано, что эффект от разработанной конструкции обделки, обеспечивающей безопасный уровень аэродинамического давления, достигает 12,5% уменьшения давления в тоннелях при коэффициенте блокирования от 0,1916 до 0,261 и коэффициенте длины 5. В тоннелях с коэффициентом длины до 7 отмечается эффект снижения давления до 10% относительно значений, полученных для конструкции тоннельной обделки без сквозных каналов. Установлены эффективные диапазоны параметров сквозных каналов, при которых возможна компенсация избыточного давления.

Предложены рекомендации к конструктивному решению обделки однопутного тоннеля, в том числе с точки зрения несущей способности.

Конструктивное решение обделки обладает потенциалом к уменьшению материалоемкости и улучшению технико-экономических характеристик тоннелей на ВСМ (отсутствие вспомогательных выработок и дополнительных объемов разработки грунта). При улучшенном режиме эксплуатации в отношении аэродинамических воздействий вариант конструкции со сквозными каналами может позволить безопасно сократить площадь поперечного сечения до 16%.

Сооружение тоннелей на ВСМ щитовым способом с конструктивным решением обделки, учитывающим аэродинамические особенности, позволит получить рациональное круговое очертание поперечного сечения тоннеля, способного уменьшать интенсивность аэродинамических воздействий, возникающих при скорости движения поезда до 400 км/ч. Перспективой исследования является уточнение прочностных характеристик разработанного конструктивного решения обделки и характеристик сквозных каналов: определение особенностей применяемых материалов, внутренней геометрии и структуры поверхности – шероховатости и формы каналов.

Конструктивное решение обделки обладает значительным потенциалом и может быть применено при проектировании и строительстве для дальнейшей эффективной эксплуатации перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий: Ростов–Адлер, Казань–Екатеринбург и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований были достигнуты поставленные цели и сформулированы основные научные выводы:

1. Разработана и апробирована математическая модель для численного исследования аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на высокоскоростных магистралях. Выполнено численное моделирование аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле на ВСМ при различных значениях скорости движения поезда, площади поперечного сечения тоннеля и его длины, а также аэродинамических параметров среды. Результаты расчетов аэродинамического давления показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными и натурными данными других исследователей (до 89 %). Выявлено, что при возрастании скорости движения поезда до 400 км/ч возможно возникновение предельных величин аэродинамического давления, которое может достигать значений 15–16 кПа и более.

2. Исследовано влияние геометрических параметров однопутных тоннелей и высокоскоростных поездов на характер аэродинамического взаимодействия системы «тоннель – воздушная среда – поезд» и установлены функциональные зависимости аэродинамического давления от основных параметров системы. Площадь поперечного сечения тоннеля и коэффициент блокирования оказывают более существенное влияние при значениях менее $80\text{--}82,5\text{ м}^2$ и более $0,1796\text{--}0,174$ соответственно. Определено, что по причине явления интерференции тоннельных волн интенсивный рост и наиболее значительные перепады давления, вне зависимости от значения площади поперечного сечения тоннеля, наблюдаются при движении поездов по тоннелям с коэффициентом длины от 2 до 7. При этом с ростом коэффициента длины аэродинамическое давление стабилизируется, оставаясь избыточным.

3. Разработана методика расчёта аэродинамического давления в системе «тоннель – воздушная среда – поезд» в условиях скоростного (от 160 км/ч) и высокоскоростного движения (до 400 км/ч), что позволяет повысить эффективность проектных решений железнодорожных тоннелей. Методика расчета

позволяет оценить аэродинамическое давление при заданных требованиях и параметрах, определить наиболее благоприятное сочетание параметров, обеспечивающих комфорт и безопасность пассажиров на основе системного подхода. По результатам выполненных исследований даны практические рекомендации по назначению площади поперечного сечения тоннеля в зависимости от скорости движения поездов с учетом соблюдения критерия безопасности $\Delta P \leq 10$ кПа: при движении поезда в тоннеле со скоростью 350 км/ч, при коэффициенте длины 3 следует определять граничное значение коэффициента блокирования, равное 0,234; при движении поезда в тоннеле со скоростью 400 км/ч, коэффициенте длины 3 следует определять граничное значение коэффициента блокирования, равное 0,190.

4. Предложено конструктивное решение обделки кругового очертания однопутного тоннеля на ВСМ и обоснована его эффективность в снижении аэродинамического давления в однопутных тоннелях в условиях скоростного и высокоскоростного движения. При коэффициенте блокирования от 0,1916 до 0,261 аэродинамическое давление в тоннелях с коэффициентом длины 5 при прохождении поезда со скоростями до 400 км/ч возможно смягчить до 12,5%, в тоннелях с коэффициентом длины до 7 отмечено снижение давления до 10% относительно значений, полученных для конструкции тоннельной обделки без сквозных каналов. Интенсивность перепадов изменяется по длине тоннеля менее, чем на 5%, однако для протяженных тоннелей такое изменение носит существенный характер из-за продолжительности аэродинамического воздействия. В сравнении с типовым конструктивным вариантом тоннельной обделки конструкция со сквозными каналами позволяет безопасно сократить площадь поперечного сечения до 16% без перепадов давления, превышающих критические. Конструктивное решение обделки обладает потенциалом к уменьшению материалоемкости и улучшению технико-экономических характеристик тоннелей на ВСМ. Сооружение тоннелей на ВСМ щитовым способом с конструкцией обделки, учитывающей аэродинамические особенности, позволит получить эффективное круговое очертание поперечного сечения тоннеля в условиях

движения поездов со скоростями 250 – 400 км/ч.

5. Полученные результаты исследований внедрены в организациях, выполняющих проектные работы в рассматриваемой области, что подтверждается справками и актами о внедрении.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и строительстве горных, подводных, городских, базисных железнодорожных тоннелей, а также для дальнейшей эксплуатации перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий: Ростов–Адлер, Казань–Екатеринбург.

Перспективой дальнейших исследований является развитие методики проектирования железнодорожных тоннелей на скоростных и высокоскоростных магистралях с учетом аэродинамического взаимодействия на основе комплексного подхода к вопросу обеспечения безопасности при движении поездов, исследование влияния локального температурно-влажностного режима тоннелей на ВСМ на аэродинамическое давление и экспериментальная верификация методики с целью определения влияния температуры в тоннеле на давление и характер изменений аэродинамических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 284 с.
2. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
3. Анимисов, П.С. Векторы развития высокоскоростных поездов / П.С. Анимисов // Мир транспорта. – 2011. – №2. – С. 38–49.
4. Аэродинамическое воздействие скоростных поездов на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД» / С. М. Каплунов, Н. Г. Вальес, Н. А. Махутов, С. И. Дубинский, В. А. Самсонов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 1–2. – С. 47–57.
5. Бушуев, Н.С. Рекомендации по выбору параметров круговых кривых при совмещенном движении высокоскоростных пассажирских и скоростных специальных грузовых поездов / Н.С. Бушуев, С.В. Шкурников, В.А. Голубцов // Техника железных дорог. – 2016. – 2 (34). – С. 71-75.
6. Вальгер, С. А. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // С. А. Вальгер, А. В. Фёдоров, Н. Н. Фёдорова // Вычислительные технологии. – 2013. – № 5. – С. 27–40.
7. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т./ И.П. Киселев и др.; под ред. И.П. Киселева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020.
8. Гендлер, С. Г. Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. А. Плескунов // ГИАБ. – 2009. – Отдельный выпуск №13: Аэрология. – С. 81–89.
9. Гладышев, Н.Н. Гидрогазодинамика: конспект лекций / ГОУВПО СПбГТУРП. СПб, 2012. – 159 с.
10. Григорьев, Ю.Д. Избыточность локально D-оптимальных планов и гомотетии / Ю.Д. Григорьев, В.Б. Мелас, П.В. Шпилев // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2017. – Т. 4 (62). Вып. 4 – С. 552-562.

11. Джаббаров, С. Т. Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы в условиях скоростного движения поездов в Узбекистане / С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20, № 3. — С. 531–543.

12. Джаббаров, С.Т. К вопросу выбора параметров проектирования объектов инфраструктуры высокоскоростных железных дорог / С.Т. Джаббаров, М. Мирахмедов, Б. Мардонов // Инновационный транспорт. –2017. – №2 (24) – С. 35-38.

13. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 № 466/р. – М., 2019.

14. Дубинский, С. И. Численное моделирование аэродинамики высокоскоростного и магнито-левитационного транспорта / С. И. Дубинский // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 4. – С. 34–44.

15. Дубинский, С. И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : дисс. ... канд. тех. наук: / Дубинский Сергей Иванович. – М., 2010.–198 с.

16. Дьяченко, Л.К. Динамическое взаимодействие разрезных балочных пролётных строений мостов и подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : автореф. дис. ... канд. техн. наук: / Дьяченко Леонид Константинович – Санкт-Петербург, 2017. – 24 с.

17. Зернов, И.И. Воздействие высокоскоростного подвижного состава на верхнее строение пути и конструкции обделок тоннелей из опускных секций / И.И. Зернов, Е.А. Пестрякова, С.С. Харитонов // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 2 (76). – С. 18-26.

18. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик, под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., пер. и доп. – М.: «Машиностроение», 1992. – 672 с.

19. Кавказский, В. Н. Безопасность пассажиров и аэродинамика тоннелей на высокоскоростных магистралях / В. Н. Кавказский, О. О. Шелгунов //

III Бетанкуровский международный инженерный форум: Сборник трудов. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. – Том 1. – С. 143-146.

20. Кавказский, В.Н. Исследование аэродинамики движения поезда в однопутных тоннелях на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В.Н. Кавказский, О.О. Шелгунов // Транспортное строительство. – 2022. – № 4. – С. 37–40.

21. Колос, А.Ф. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий / А.Ф. Колос, И.С. Козлов // БРНИ. – 2013. – №1-2 (6-7). – С.16–21.

22. Комбинационный подход при моделировании аэродинамики скоростных железнодорожных составов / С. М. Каплунов, Н.Г. Вальес, А.В. Самолысов, С.И. Дубинский // Техника железных дорог. – 2015. – № 1. – С. 48–55.

23. Красюк, А. М. Использование модели статического воздухораспределения при исследовании динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене / А. М. Красюк, И.В. Лугин // ФТПРПИ. – 2007. – № 6. – С. 87–94.

24. Кузнецов, А.О. Определение устойчивости ядра выработки круглого поперечного сечения / А.О. Кузнецов, Р.Я. Горшков // Интеллектуальный потенциал Сибири: материалы конф. (г. Новосибирск 17-21 мая 2021г.) НГТУ. – Новосибирск, 2021. – Т.ч.4 – С.174-176.

25. Лабутин, Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры / Н. А. Лабутин // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. № 4. – С. 6–16.

26. Ларина, Е.В. Численное моделирование высокоскоростных турбулентных течений на основе двух и трехпараметрических моделей турбулентности : специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : автореф. дис. ... канд.техн.наук / Ларина Елена Владимировна – М., 2014 – 23 с.

27. Лебедев, М. О. Международный тоннельный конгресс в Дубаи / М. О. Лебедев // Метро и тоннели. – 2018. – № 3. – С. 2–11.

28. Ледяев, А.П. К вопросу об аэродинамических воздействиях в тоннелях на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А.П. Ледяев, В.Н. Кавказский, О.О. Шелгунов // Образование, наука и инновации в XXI веке

(12-30 ноября 2018 г., СПб.) : сб. тр. XII Санкт-Петербургского конгресса – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – С. 144–145.

29. Ледяев, А. П. Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях / А. П. Ледяев, В. Н. Кавказский, О. О. Шелгунов // Метро и тоннели. – 2021. – № 3. – С. 40–43.

30. Ледяев, А.П. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях/ А.П. Ледяев, В.Н. Кавказский, Р.О. Креер // Транспорт Урала. – 2015. – № 4 (47) – С. 3–9.

31. Ледяев, А.П. Системный подход к оценке аэродинамических воздействий в тоннелях на высокоскоростных магистралях / А.П. Ледяев, О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018 (13-14 ноября 2018 г., СПб.) : материалы межд. научно-практ. конф. : СПб. ИПТ РАН. – Санкт-Петербург. 2018. Том 1. – С. 219–223.

32. Ледяев, А.П. Факторы, влияющие на особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях / А.П. Ледяев, О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // Августин Бетанкур: от традиций к будущему инженерного образования (1-2 февраля 2018 г., СПб.) : сб. тр. межд. научно-практ. конф. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – С.108-114.

33. Лугин, И.В. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях / И.В. Лугин, Е.Л. Алферова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – № 5. – С. 155–160.

34. Лугин, И.В. Математическое моделирование динамики воздухораспределения от поршневого действия поездов в протяженных железнодорожных тоннелях / И.В. Лугин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2020 – Т. 7, № 2. – С.145–149.

35. Макаричев, Ю. А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

36. Меркин, В. Е. Аэродинамика движения высокоскоростных поездов в тоннеле: некоторые результаты проведенных в мире исследований / В. Е. Меркин, В. В. Космин // Метро и тоннели. – 2021. – № 1. – С. 29–33.

37. Меркин, В. Е. О нормах проектирования тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Е. Меркин, В. В. Космин // Транспортное строительство. – 2013. – № 7. – С. 12–14.

38. Меркин, В. Е. Современное тоннелестроение: стоимость строительства и цена нештатных ситуаций / В. Е. Меркин, Е.Н. Петрова // Транспортное строительство. – 2023. – № 1. – С. 6–8.

39. Методы оценки осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов / И.А. Гуськов, Е.А. Пестрякова, С.С. Харитонов, Е.Ю. Титов // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6. № 3. – С. 16.

40. Назаров, О.Н. Оптимальные решения для ВСМ–2 Москва – Екатеринбург: выбор основных параметров высокоскоростного электропоезда / О.Н. Назаров // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – №6. – С.16–22.

41. Оптимизация аэродинамики высокоскоростных поездов. Железные дороги мира. – 2011. – № 9. – С. 42–46.

42. Патент № 2683841 Рос. Федерация, МПК E21D 9/14; E21D 11/20 Тоннель для высокоскоростного подвижного состава : №2018120265 : заявл. 31.05.2018 : опубл. 02.05.2019 / В.Н. Кавказский, О.О. Шелгунов; – патентообладатель ПГУПС, Бюл. №10.

43. Планирование эксперимента / А.В. Бенин, В.В. Гарбарук. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 90 с.

44. Плескунов, В.А. Аэрогазодинамические процессы при проветривании железнодорожных тоннелей с транспортными средствами на дизельной тяге : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореф. дис. ... канд. техн. наук: / Плескунов Василий Анатольевич – Санкт-Петербург, 2011. – 21 с.

45. Поляков, Б.О. Взаимодействие высокоскоростного поезда с воздушной средой вблизи объектов инфраструктуры / Б.О. Поляков, Е.Я. Ватулина // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2017. – №3 (70). – С. 25–28.

46. Полякова, Е.Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава : специальность 05.22.07

«Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.22.07 / Полякова Екатерина Яновна – Санкт-Петербург, 2021. – 18 с.

47. Применение различных моделей турбулентности для расчета несжимаемых внутренних течений / П.А. Баранов, С.В. Гувернюк, М.А. Зубин, С.А. Исаев, А.Е. Усачов // Ученые записки ЦАГИ. – 2017. – №1 (48). – С. 26-36.

48. Проектно-исследовательское макетирование железнодорожного тоннеля на высокоскоростной магистрали / О. О. Шелгунов, В. И. Заводников, Д. М. Оленич, В. В. Троицкий // Техника и технология наземного транспорта (18 декабря 2019 г., Н. Новгород) : материалы межд. студ. науч.- практ. конф. в 2 ч. – Н. Новгород: научно-издательский центр «XXI век», 2020. – ч.2, 596 с. – С. 55–58.

49. Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта / К. К. Ким, И. Р. Крон, Я. С. Ватулин, Е. Я. Ватулина // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, № 2. – С. 263–267.

50. Руководство по проектированию и строительству тоннелей щитовым методом / пер. с англ. с доп. и коммент. В.Е. Меркина, В.П. Самойлова - М. : Метро и тоннели, 2009. - 448 с.

51. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019611485 Рос. Федерация. Предельное вертикальное давление грунта при прорезании его круглым поперечным сечением программа для ЭВМ / А.О. Кузнецов ; правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – №2019610109 : заявл. 09.01.19 : опубл. 28.01.2019, Бюл. № 2, 132 Кб.

52. Сентябов А.В. Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных течений / А.В. Сентябов, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерев // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – т. 18, № 1.– С. 81–93.

53. СП 122.13330.2023 Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуал. редакция СНиП 32-04-97. – Москва: Минрегион России, 2023. – 101 с.

54. СП 453.1325800.2019 Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий, правила проектирования и строительства. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 138 с.

55. Специальные технические условия. «Верхнее строение пути участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» / ФГБОУ ВО ПГУПС, СПб., 2016.

56. Специальные технические условия. «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» / ФГБОУ ВО ПГУПС, СПб., 2016.

57. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.08 № 877/р, 171 с.

58. Суровин, П.Г. О точности определения координат точек контура закрепленного лба забоя выработки при строительстве подземных сооружений / П.Г. Суровин, А.О. Кузнецов / Вестник сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021 – 2(57). – С.49-52.

59. Технический регламент Таможенного союза “О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта” (ТР ТС 002/2011), 72 с.

60. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений / А.В. Гарбарук – СПб.: СПГПУ, 2010. – 127 с.

61. ТКП EN 1991-1-4-2009 (02250) ЕВРОКОД 1. Воздействия на конструкции. Часть 1 – Общие воздействия. Ветровые воздействия.

62. Улучшение аэродинамики высокоскоростных поездов посредством микровдува / Е.А. Шквар, А. Джамеа, Ш.-Ю. Е, Ц.-Ч. Цай, А.С. Крыжановский // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – т. 25, № 5. – С. 701– 714.

63. Устинов, М.В. Ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое (обзор) / М.В. Устинов // Ученые записки ЦАГИ.– 2013. – №1 (44). – С. 3– 43.

64. Фролов, Ю.С. Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Ю.С. Фролов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2010. – №1 (26) – С.28–31.

65. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей / А.С. Ватаев,

Я.С. Ватулин, А.А. Воробьев, К.А. Сотников // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 2. – С. 104–123.

66. Чурков, Н.А. Аэродинамика железнодорожного поезда. (Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд). – М.: Желдориздат, 2007. – 332 с.

67. Шашков, В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учеб. пособие / В.Б. Шашков – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.

68. Шелгунов, О.О. Анализ направлений модернизации железнодорожных тоннелей на высокоскоростных магистралях мира с перспективой применения в Российской Федерации / О.О. Шелгунов // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019 (12-13 ноября 2019 г., СПб.): материалы межд. научно-практ. конф.: СПб. ИПТ РАН. – Санкт-Петербург. 2019. Том 2. – С. 43 – 46.

69. Шелгунов, О.О. Оценка объемно-планировочных и конструктивно-технологических решений Готардского базисного тоннеля / О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы (17-24 апреля 2017 г.): сб. тр. LXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2017. – С. 446 – 451.

70. Шелгунов, О.О. Применение приложения SolidWorks FlowSimulation для моделирования аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на тоннель / О.О. Шелгунов // Системы автоматизированного проектирования на транспорте (18-19 апреля 2019 г.): Тезисы докладов VIII межд. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Санкт-Петербург. 2020. 170 с. – С. 167 – 172.

71. Шелгунов, О.О. Разработка и исследование конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростных железнодорожных магистралей с учетом аэродинамических процессов / О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // Интернет – журнал «Транспортные сооружения». – 2022. – Т 9. – № 3. – <https://doi.org/10.15862/02SATS322>

72. Шелгунов, О.О. Совершенствование конструктивного решения однопутных тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях с учетом аэродинамических процессов / О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы (18-25 апреля 2022 г.): сб. тр. LXXXII

Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах. Том 1. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. – С. 83-87.

73. Шелгунов, О.О. Сравнительный анализ методов численного определения аэродинамических воздействий в тоннелях / О.О. Шелгунов, В.Н. Кавказский // НЕДЕЛЯ НАУКИ – 2018: Сборник лучших докладов обучающихся факультета «Транспортное строительство». – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2018. – С. 27 – 31.

74. Шелгунов, О.О. Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях / О.О. Шелгунов // IV Бетанкуровский международный инженерный форум (30 ноября – 2 декабря 2022 г.): Сборник трудов. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. – С. 404–406.

75. Шкурников, С.В. Общие требования к проектированию высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань / С.В. Шкурников, Н.С. Бушуев, В.А. Голубцов // Транспорт Российской Федерации – 2015 – №2 (57). – С.26-29.

76. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг – пер. с нем. М., «Иностранная литература», 1956. – 528 с.

77. A full-scale experimental and modelling study of ballast flight under high-speed trains / A. Quinn, M. Hayward, C. Baker, F. Schmid, J. Priest, W. Powrie // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2010. – Vol.224 (2) – P. 61–74.

78. Aerodynamic Assessment and Mitigation – Design Considerations for High-Speed Rail / R. Sturt, P. Lynch, R. Burns, S. Clark, B. Horton, P. Derkowski, A. Keylin, N. Wilson: Arup Group Limited; Association of American Railroads. Transportation Technology Center, Inc. (TTCI), 2019. – 331 pp. – URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/63096> (дата обращения 18.03.2023)

79. Aerodynamic Effects Produced by a High-Speed Train Traveling through a Tunnel Considering Different Car Numbers / J.-M. Du, Q. Fang, G. Wang, J. Wang, J.-Y. Li // Symmetry. – 2022. – №14 (3). – 479.

80. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research / J. Niu, Y. Sui, Q. Yu, X. Cao, Y. Yuan // Energy and Built Environment. – 2020. – №1 (4). – P. 351–375.

81. Air flow and differential pressure characteristics in the vacuum tube transportation system based on pressure recycle ducts / W. Jia, K. Wang, A. Cheng, X. Kong, X. Cao, Q. Li // *Vacuum*. – 2018. – № 150. – P.58-68.
82. Analysis of aerodynamic characteristics for the selection of cross-section to the TBM railway tunnels / H.K. Lee, H.W. Kang, H.S. Kim, H.M. Kim // *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*. – 2013 – Vol.15 (6). – P. 625-635.
83. Analysis on aerodynamic pressure of tunnel wall of high-speed railways by full-scale train test / F. Liu, S. Yao, T.-H. Liu, J. Zhang // *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. – 2016. – Vol.50 (10). – P.2018–2024.
84. ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual.
85. Application of the mesh fusion method in numerical simulation of a high-speed train passing through a tunnel / X. L. Chen, C. Y. Zhang, J. L. Xu, Y. R. Jin, Y. G. Mei // *Computer Engineering and Science*. – 2016 – Vol.38 (3). – P. 431–436.
86. Baker, C. A review of train aerodynamics. Part 1 – Fundamentals. *The Aeronautical Journal*. – 2014. – Vol. 118 (1201). – P. 201–228.
87. Baker, C. A review of train aerodynamics. Part 2 – Applications. *The Aeronautical Journal*. – 2014. – Vol. 118 (1202). – P.345–382.
88. Baker, C. Aerodynamic pressures around high-speed trains: the transition from unconfined to enclosed spaces / C. Baker, T. Gilbert, A. Quinn // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2013. – Vol. 227 (6). – P. 609-622.
89. Bellenoue, M. Experimental 3-D simulation of the compression wave, due to train-tunnel entry / M. Bellenoue, V.Moriniere, T. Kageyama // *Journal of Fluids and Structures*. – 2002 – Vol.16 (5) – P. 581–595.
90. Bourquin, V. Rapport Final – Etude Principale / V. Bourquin, M. Mossi // *Groupe Mecanique, Rapport Swissmetro: Lausanne, 1998*. – P. 581–595.
91. California High-Speed Train Project, TECHNICAL MEMORANDUM: Basic High-Speed Train Tunnel Configuration, 2011.
92. Degen, K. Acoustic Assessment of Micro-pressure Waves Radiating from Tunnel Exits of DB High-Speed Lines / K. Degen, C. Gerbig, H. Omnich // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid*

Mechanics and Multidisciplinary Design. – Berlin, Heidelberg: Springer. – 2008. – Vol 99. – P.48-55.

93. Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel / T. Maeda, T. Matsumura, M. Iida, K. Nakatani, K. Uchida // In Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan. – 1993. – Vol. 2 – P. 315–319.

94. Ehrbar, H. Optimum tunnel system with regard to the entire lifecycle for long rail tunnels / H. Ehrbar, C. Tanno, H.-P. Vetsch // Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy– 2019. – P. 3664–3673 (17)

95. Ehrbar, H. Selection of the optimum tunnel system for long railway tunnels with regard to the entire lifecycle / H. Ehrbar, C. Tanno, H.-P. Vetsch // https://www.heinzehrbarpartners.com/wp-content/uploads/2020/04/2019-UC_2019-panel-discussion-01-Ehrbar.pdf (дата обращения 29.06.2022)

96. EN 14067-3:2003 Railway applications. Aerodynamics. Part 3: Aerodynamics in tunnels. – 2003. – 14 p.

97. EN 14067-5:2006 Railway applications. Aerodynamics. Part 5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnels. – 2006. – 35 p.

98. Faramehr, S. Aerodynamic of the Trains in Tunnels: thesis for the master degree in civil engineering / Samane Faramehr. – University of Birmingham, UK, 2014. – 76 p.

99. Field measurements of aerodynamic pressures in high-speed railway tunnels / F. Liu, S. Yao, J. Zhang, Y.-Q. Wang // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – Vol. 72. – P. 97–106.

100. Field study on the interior pressure variations in high-speed trains passing through tunnels of different lengths / T.-H. Liu, X.-D. Chen, W.-H. Li, [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. –2017. – 169. – P.54–66.

101. Flow structure and aerodynamic behavior evolution during train entering tunnel with entrance in crosswind / W. Yang, E. Deng, M. Lei, P. Zhang, R. Yin // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – Vol. 175. – P. 229-243.

102. Forasassi, G. CFD analysis of pressure waves and loads on non-tight trains passing tunnels: thesis on double degree master in aerospace engineering / Giovanni Forasassi. – KTH, Stockholm, Sweden; Polytechnic University of Turin, Italy, 2016. – 212 p.
103. Fujii, K. Aerodynamics of high speed trains passing by each other / K. Fujii, T. Ogawa // *Computers and Fluids*. – 1995. – 24 (8). – P.897–908
104. Fukuda, T. Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel / T. Fukuda, T. Miyachi, M. Iida // *Proceedings of the 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels*, 2006. – 2. – P. 777-788.
105. Full-Scale Experimental Investigation of the Interaction between Trains and Tunnels / C. Somaschini, T. Argentini, E. Brambilla, D. Rocchi, P.Schito, G. Tomasini. // *Applied Sciences* – 2020. – № 10(20). – 7189.
106. Gawthorpe, R. Pressure effects in railway tunnels / R. Gawthorpe // *Rail international*. – 2000. – 31. – P. 10-17.
107. Gawthorpe, R. Tunnel aerodynamic design within the European high-speed rail network / R. Gawthorpe // *Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels*, 2000.
108. Gilbert, T. Aerodynamic effects of high speed trains in confined spaces: thesis for PhD degree in civil engineering / Timothy Gilbert. – University of Birmingham, UK, 2013. – 236 p.
109. Hara, T. Model tests on aerodynamical phenomena of a high speed train entering a tunnel / T. Hara, J. Okushi // *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute* – 1962. – 13 (4). – P. 6-10.
110. Howe, M. S. On the role of separation in compression wave generation by a train entering a tunnel hood with a window / M.S. Howe // *Journal of Applied Mathematics*. – 2005. – 70(3). – P. 400–418.
111. Influence of the geometry of equal-transect oblique tunnel portal on compression wave and micro-pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels / L. Zhang, K. Thurow, N. Stoll, H. Liu. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2018. – 178. – P. 1-17.

112. Influence of the shape and size of cavities on pressure waves inside high-speed railway tunnels / D. Heine, K. Ehrenfried, H. Kühnelt, S. Lachinger [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019. – Vol. 189. – P. 258-265.
113. Jia, Y. X. Characters of pressure wave caused by high-speed trains passing tunnels based on 1D non-homentropic flow model / Y. X. Jia, Y. G. Yang, Y. G. Mei // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 50 (24). – P. 106-114.
114. Jia ,Y. X. Numerical Simulation on Air Resistance of High-speed Train Passing through Tunnel / Y. X. Jia, J. Jing, Y. G. Mei. // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – 56 (4). – P.193-200.
115. Korolev, K.V. Analysis of reinforced soil sustainability while tunnel construction / K.V. Korolev, A.G. Polyankin, A.O. Kuznetsov / *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – 95 (3). – P. 80–89.
116. Kwon, H.B. A study on the minimum cross-sectional area of high-speed railway tunnel satisfying passenger ear discomfort criteria / H.B. Kwon // *Journal of Computational fluids engineering*. – 2015. – 20 (3). – P. 62 -69.
117. Li, R. X. Pressure waves in tunnels when high-speed train passing through / R. X. Li, L. Yuan // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2014 – Vol. 50 (24). – P. 115-121.
118. Li, W.-H. Three-dimensional Characteristics of the Slipstream Induced by a High-Speed Train Passing through a Tunnel / W.-H. Li, T.-H. Liu // *2nd International Conference on Industrial Aerodynamics ICIA, 2017: DEStech Transactions on Engineering and Technology Research* – P.502-512.
119. Liu, T.-H. Aerodynamic Effects Caused by Trains Entering Tunnels / T.-H. Liu, H.-Q. Tian, X.-F Liang, // *Journal of transportation engineering* – 2010. –136 (9). – P. 846-853.
120. Luo, J. J. Aerodynamic effect induced by high-speed train entering into tunnel in high altitude area / J. J. Luo // *Journal of Southwest Jiaotong University*. – 2016. – Vol. 51 (4). – P. 607-614.
121. Luo, J. J. Study on changes of pressure waves induced by a high-speed train entering into a tunnel with hood / J. J. Luo, H. D. Ji // *Journal of the China Railway Society*. – 2011. – Vol. 33 (9) – P. 114-118.

122. Mathematical modeling of aerodynamic processes in railway tunnels on high-speed railways / A Ledyayev, V. Kavkazskiy, Ya. Vatulin, V. Svitin, O. Shelgunov // E3S Web of Conferences. 157 (47). KTTI-2019 – 2020. – P. 06017. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706017>

123. Mei, Y. A Generalized Numerical Simulation Method for Pressure Waves Generated by High-Speed Trains Passing through / Y. Mei // Advances in Structural Engineering. – 2013. – 16 (8). – P. 1427-1436

124. Montenegro-Palmero N., Tunnel gradients and aural health criteria for train passengers / N. Montenegro-Palmero, A. Vardy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2014. – 228 (7). – P. 821-832.

125. Moving Model Test of High-Speed Train Aerodynamic Drag Based on Stagnation Pressure Measurements / M. Yang, J. Du, Z. Li, S. Huang, D. Zhou // PLoS ONE. – 2017. – 12(1). – e0169471. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169471>

126. Nose shape optimization of high-speed train minimization of tunnel sonic boom / H. B. Kwon, K. H. Jang, Y. S. Kim, K. J. Yee, D. H. Lee // JSME International Journal Series C-mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing. – 2001. – 44 (3). – P.890–899.

127. Numerical simulation of the Reynolds number effect on the aerodynamic pressure in tunnels / J.-Q. Niu, D. Zhou, X.-F. Liang [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – Vol. 173. – P. 187–198.

128. Numerical study on the basic characteristics of pressure waves at the entrances of high speed railway tunnels / R. L. Wang, Y. G. Mei, J. L. Xu, C. H. Zhou, Y. X. Jia // Modern Tunnelling Technology. – 2016. – Vol. 53 (2) – P. 95-100.

129. Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave / Y.-C. Ku, J.-H. Rho, S.-H. Yun, H.-B. Kwon [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization – 2010. – 42. – P.965–976.

130. Palmer, F. S. Aeroacoustics in High speed trains: dissertation for degree of doctor of philosophy / Felix Sorribes Palmer. – Universidad Politecnica de Madrid, Spain 2014. – 134 p.

131. Passenger comfort on high-speed trains: effect of tunnel noise on the subjective assessment of pressure variations / S. Sanok, F. Mendolia, M. Wittkowski, D. Rooney [et al.] // *Ergonomics*. – 2015. – 58 (6). – P.1022-1031.

132. Passive control of a pressure wave propagating through in a high-speed railway tunnel / S. Nakao, T. Aoki, K. Matsuo, T. Tanino // *Proceedings of the Dynamics & Design Conference*. – 2003. – №03 (7). – P. 16–20.

133. Patsekha, A. Study of FDS Capabilities to Assess the High-Speed Train Impact on Pressure Pattern Within a Railway Tunnel / A. Patsekha, R. Galler // *Berg Huettenmaenn Monatsh* – 2021. – Vol. 166 (12). – P.567–575. – <https://doi.org/10.1007/s00501-021-01170-7>

134. Poliakov, V. The artificial intelligence and design of multibody systems with predicted dynamic behavior / V. Poliakov // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 14. – P. 972-977.

135. Prediction and validation on the sonic boom by a high-speed train entering a tunnel / T.S. Yoon, S. Lee, J.H. Hwang, D.H. Lee // *Journal of Sound and Vibration*. – 2001. – 247 (2). – P.195–211.

136. Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels / A. Martínez, E. Vega, J. Gaite, J. Meseguer // *Proceedings of the BBAA VI International Colloquium on Blu Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, 20–24 July 2008*.

137. Pyeon, J.-H. Trend Analysis of Long Tunnels Worldwide: MTI Report WP 12-09. – 2016. – 51 p.

138. Reinke, P. Aerodynamics and ventilation in rail tunnels / P. Reinke, M. Flueckiger, T. Wicht. – 2015. – URL: <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-May2015-Aerodynamics-and-ventilation-in-rail-tunnels-civil-measures.php> (дата обращения 29.06.2022).

139. Report material China Ministry of Railway. High-speed railway tunnel lining section – Analysis of a cross-section of a railway tunnel: on calculations of the aerodynamic effect of a single-track tunnel. China Railway Press – 2017 [in Chinese].

140. Research on the actual discomfort when a single train passes through a super long tunnel / Y. G. Mei, C. Y. Zheng, C. H. Zhou, Y. X. Jia, M. Wu // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 51 (14) – P. 100-107.

141. Ricco, P. Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel / P. Ricco, A. Baron, P. Molteni // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2007. – 95 (8). – P. 781–808.
142. Schetz, J. Aerodynamics of High-Speed Trains / J. Schetz // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2001. – 33 (1). – P.371–414.
143. Sugimoto, N. “Shock-free” tunnel for future high-speed trains / N. Sugimoto. // *Proceedings of International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, November 22-26, 1993* / Japan Society of Mechanical Engineers, 1993. – P. 284–292.
144. Suzuki, M. Unsteady Aerodynamic Force Acting on High Speed Trains in Tunnel / M. Suzuki // *Quarterly Report of RTRI*. – 2001. – Vol. 42 (2). – P. 89-93.
145. The influence of reduced cross-section on pressure transients from high-speed trains intersecting in a tunnel / Y. Lu, T. Wang, M. Yang, B. Qian // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2020. – 201. – P.104161. - <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104161>
146. Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal / M. Howe, M. Iida, T. Fukuda, T. Maeda // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2000. – 425. – P.111-132.
147. Thompson, J. Tunnel Configurations for the California HST Project / J. Thompson, N. Otsubo // *Network. High speed Rail*. – 2011. – №73. – P. 51-55.
148. Three-dimensional characteristics of pressure waves induced by high-speed trains passing through tunnels / T. Wang, J. Chen, J. Wang, F. Shi , L. Zhang [et al.] // *Acta Mechanica Sinica*. – 2023. – №39 (5). – <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23261-x>
149. Tollmein, N. Air resistance and pressure zones around trains in tunnels / N. Tollmein // *VDI Zeitschrift*. – 1927. – 29 (5). – P.199-203.
150. Train Aerodynamics: Fundamentals and Applications / C. Baker, T. Johnson, D. Flynn, H. Hemida, A. Quinn [et al.]. – 1 ed., Elsevier, 2019. – 402 p.
151. Transient loads and their influence on the dynamic responses of trains in a tunnel / T.-H. Liu, Z.-W. Chen, X.-D. Chen, T.-Z. Xie, J. Zhang // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – №66. – 2017. – P.121-133.
152. UIC code 779–11/R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations. – 2nd edition, UIC, 2005. – 91 p.

153. UIC code 779–9/R. Safety in Railway Tunnels. – 1st edition, UIC, 2002. – 63 p.
154. Vardy, A. An Overview of Wave Propagation in Tunnels / A. Vardy, J. Brown // In TRANSAERO – A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation. – Berlin, Germany: Springer, 2002. – 79. – P. 249–266.
155. Vardy, A. Aerodynamic drag on trains in tunnels. Part 2: prediction and validation / A. Vardy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 1996. – 210 (1). – P.39-49.
156. Vardy, A. Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operations / A. Vardy, P. Reinke // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 1999. – 213 (2). – P.71-87.
157. Vardy, A. The use of airshafts for the alleviation of pressure transients in railway tunnels / A. Vardy // Proceedings 2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, British Hydromechanics Research Association. – Fluid Engineering, Cranfield UK, 1976. – Paper C4.
158. Wang, X. Numerical analysis on aerodynamic behavior of high-speed trains in the tunnel and open air based on the virtual reality technology / Xiao Wang // Journal of Vibroengineering. – 2018. – №20 (2) – P.1144-1160
159. Wilcox, D. C. Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited / D. C. Wilcox // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 2008. – Vol. 46 (11). – P.2823-2838. – <https://doi.org/10.2514/1.36541>
160. Wilcox, D. C. Simulation of transition with a two-equation turbulence model / D. C. Wilcox // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. – 1994. – Vol. 32 (2). – P.247-255. – <https://doi.org/10.2514/3.59994>
161. Wind tunnel analysis of the slipstream and wake of a high-speed train / J. R. Bell, D. Burton, M. Thompson, [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2014. – Vol. 134. – P.122-138.
162. Zhang, H. The Longest Railway Tunnel in China / H. Zhang, C. Yang // Engineering. – 2018. – №4. – P.165–166.
163. Zhao, Y. A Statistical Analysis of China's Traffic Tunnel Development Data / Y. Zhao, P. Li // Engineering. – 2018. – №4. – P.3–5.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2683841

Тоннель для высокоскоростного подвижного состава

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I" (RU)*

Авторы: *Кавказский Владимир Николаевич (RU), Шелгунов Олег Олегович (RU)*

Заявка № 2018120265

Приоритет изобретения 31 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 31 мая 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты и справки о внедрении результатов диссертационного исследования



ОАО «РЖД»
Акционерное общество
«СКОРОСТНЫЕ МАГИСТРАЛИ»
(АО «Скоростные магистрали»)
 107078, г. Москва, ул. Маши Порываевой, д. 34
 Тел.: (495) 789-98-70, факс: (495) 789-98-71,
 E-mail: info@hsrail.ru, www.hsrail.ru

« 04 » *октября* 20*23* г. № *УОХ - 3255/СМ*

На № 005.01.5-157 от 28.09.2023

АКТ

о внедрении результатов научных исследований, выполненных аспирантом Шелгуновым Олегом Олеговичем в диссертационной работе: «Обоснование конструктивных параметров однопутных тоннелей на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях с учетом аэродинамических процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты выполненных исследований в диссертационной работе Шелгунова Олега Олеговича по специальности 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» имеют прикладное значение при проектировании и эксплуатации искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Разработанная в диссертационном исследовании методика подбора параметров тоннельных сооружений с учетом аэродинамических процессов рекомендована для использования при проектировании объектов инфраструктуры на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Результаты эксплуатации участков ВСЖМ с тоннельными сооружениями будут учитываться при выполнении научно-технических работ, обосновании целесообразности внесения изменений в нормативные документы по проектированию высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Заместитель генерального
директора по строительству



М.Н.Меркулов



ЛЕНГИПРОТРАНС

Первому проректору – проректору
по научной работе ФГБОУ ВО
ПГУПС

26.03.2024

№ 06 / 2280 КА

На № 005.01.05-42/3288 от 04.10.2023

Титовой Т. С.

№ дог. _____

[О внедрении результатов научных исследований]

АКТ

о внедрении результатов научных исследований, выполненных аспирантом Шелгуновым Олегом Олеговичем в диссертационной работе: «Обоснование конструктивных параметров однопутных тоннелей на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях с учетом аэродинамических процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты выполненных исследований в диссертационной работе Шелгунова Олега Олеговича по специальности 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» имеют прикладное значение при проектировании и эксплуатации искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Разработанная в диссертационном исследовании методика расчета аэродинамического давления и назначения конструктивных параметров однопутных тоннелей с учетом аэродинамических процессов рекомендована для применения при проектировании объектов инфраструктуры на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Результаты эксплуатации участков высокоскоростных железнодорожных магистралей с однопутными тоннелями будут учитываться при выполнении научно-технических работ, обосновании целесообразности внесения изменений в нормативные документы по проектированию высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Заместитель
главного инженера



А. П. Конохов



АО «Ленгипротранс»
Московский пр., 143, СПб, Россия, 196105
Тел.: (812) 200-1520, факс: (812) 327-1520
e-mail: 1520@lgt.ru, www.lgt.ru

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**
Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.ru; http://www.pgups.ru
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

14.09.2023 № 005.01.5-140
На № _____ от _____
Г _____ Т _____

СПРАВКА

**о внедрении результатов диссертационной работы Шелгунова О.О.
«Обоснование конструктивных параметров однопутных тоннелей на
скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях с
учетом аэродинамических процессов» в учебный процесс**

Настоящей справкой подтверждается практическое использование в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» на кафедре «Тоннели и метрополитены» факультета «Транспортное строительство» основных результатов диссертационной работы Шелгунова О.О. «Обоснование конструктивных параметров однопутных тоннелей на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях с учетом аэродинамических процессов».

Результаты, полученные Шелгуновым О.О в ходе работы над диссертацией, нашли применение в рамках подготовки магистров по дисциплинам Б1.В.4 «Инфраструктура высокоскоростных железных дорог» и Б1.В.5 «Проектирование инфраструктуры высокоскоростных железных дорог» для направления 08.04.01 «Строительство» по магистерской программе «Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Инфраструктура, экономика, экология».

Первый проректор – проректор по
учебной работе

Заведующий кафедрой «Тоннели и
метрополитены»



П.К. Рыбин

А.П. Ледяев