

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

МАГДИНА Елизавета Ростиславовна

**МЕТОД ОЦЕНКИ БРОДОХОДИМОСТИ КОЛЕСНЫХ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность: 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Добромиров Виктор Николаевич

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ БРОДОХОДИМОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН.....	16
1.1 Обоснование научной и прикладной значимости исследований в области бродоходимости транспортно-технологических машин.....	16
1.2 Анализ современных чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными гидрологическими явлениями.....	17
1.3 Исследование зарубежного и отечественного опыта предотвращения и ликвидации последствий затопления жилых зон и объектов транспортной инфраструктуры	25
1.4 Анализ номенклатуры машин, применяемых для аварийно-спасательных и других неотложных работ	29
1.5 Обоснование выбора машины-прототипа для математического моделирования.....	39
1.6 Анализ негативных факторов природно-климатического характера, вызываемых опасными гидрологическими явлениями.....	41
1.7 Обзор и анализ научных исследований по проблеме взаимодействия транспортно-технологических машин с водной и донно-опорной средой и устойчивостью их движения в зонах наводнений	47
1.8 Обзор и анализ научных исследований в области численного моделирования процесса обтекания объекта в разных средах и в области экспериментальных исследований по определению аэро- и гидродинамических характеристик	52
Выводы по главе 1.....	59
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ САМОХОДНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ЧЕРЕЗ ВОДНУЮ ПРЕГРАДУ ПО СЛАБОДЕФОРМИРУЕМОМУ ОСНОВАНИЮ	62

2.1	Постановка задачи и разработка расчетной схемы	62
2.2	Математическая модель прямолинейного движения транспортно-технологической машины через водную преграду вброд по слабдеформируемому основанию	73
2.3	Методический аппарат расчетного определения исходных данных для реализации математической модели	77
2.3.1	Определение исходных технических характеристик исследуемой машины и задание параметров воздействующих факторов водной среды.....	77
2.3.2	Определение параметров гидростатического воздействия водной среды на машину	80
2.4	Определение параметров гидродинамического воздействия водной среды на машину	89
2.4.1.	Постановка задачи для исследования лобового сопротивления... ..	89
2.4.2	Определение коэффициента сопротивления транспортно-технологической машины в водной среде методом однофазного течения.....	90
2.4.3	Определение коэффициента сопротивления транспортно-технологической машины методом моделирования двухфазного обтекания	96
	Выводы по главе 2.....	103
	ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРОДОХОДИМОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН	105
3.1	Цель и задачи экспериментальных исследований.....	105
3.2	Экспериментальное исследование факторов гидростатического воздействия водной среды на транспортно-технологическую машину.....	106
3.3	Исследование факторов гидродинамического воздействия водной среды на транспортно-технологическую машину	110
3.3.1	Цель и задачи экспериментального исследования, методика проведения и система обработки результатов	110
3.3.2	Описание экспериментальной установки.....	114
3.3.3	Описание модели	117
3.3.4	Критерии подобия.....	119

3.3.5	Планирование полнофакторного эксперимента	125
3.4	Обработка результатов эксперимента по определению коэффициентов гидродинамического сопротивления	127
3.4.1	Статистическая обработка результатов эксперимента	127
3.4.2	Результаты определения коэффициентов лобового и бокового гидродинамического сопротивления	130
3.4.3	Сравнение результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными.....	132
3.4.4	Оценка изменения коэффициентов аэродинамического сопротивления транспортно-технологической машины при изменении угла набегания потока	133
3.4.5	Определение сил лобового и бокового сопротивления для натурального образца транспортно-технологической машины.....	136
	Выводы по главе 3.....	137
	ГЛАВА 4. МЕТОД РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ БРОДОХОДИМОСТИ ОБРАЗЦОВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН	140
4.1	Алгоритм метода расчетной оценки бродоходимости транспортно-технологических машин	140
4.2	Пример реализации разработанного расчетного метода при оценке бродоходимости экскаватора-погрузчика JCB 4СХ.....	143
4.2.1	Определение выталкивающей силы воды.....	143
4.2.2	Определение сил лобового сопротивления при прямолинейном движении транспортно-технологической машины в стоячей воде	144
4.2.3	Определение боковой силы сопротивления при неподвижной транспортно-технологической машине, обтекаемой водной преградой сбоку с постоянной скоростью	147
4.2.4	Определение силы лобового и бокового сопротивления при прямолинейном движении транспортно-технологической машины с постоянной скоростью при боковом обтекании водной преграды с постоянной скоростью..	150
4.2.5	Определение сил сопротивления боковому скольжению.....	155

4.3 Сравнение сил, полученных экспериментальным и расчетным методами	158
4.4 Технико-экономическое обоснование способов доставки экскаватора-погрузчика JCB 4СХ через водную преграду	160
Выводы по главе 4.....	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	169
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Тестовая задача по определению коэффициента сопротивления методом однофазного течения.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты аэродинамического эксперимента	208
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты статистического анализа значений коэффициента бокового сопротивления и коэффициента момента рысканья	210
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.....	216
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты внедрения	217

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Осуществление строительных работ в условиях неосвоенной местности, обеспечение мобильности инженерно-технических средств силовых структур требует применения техники, приспособленной к движению и работе в условиях воздействия водной среды. Эффективная организация аварийно-спасательных и восстановительных мероприятий в зонах затопления сопряжена с преодолением принципиальных трудностей, связанных с транспортировкой личного состава, техники и оборудования. Ключевое решение данной проблемы лежит в области применения специализированных транспортно-технологических машин (далее – ТТМ), обладающих повышенной проходимостью и функциональностью на насыщенных водой грунтах и в условиях подтопления местности. Для таких машин критически важными становятся эксплуатационные свойства, обеспечивающие высокую подвижность, устойчивость и безопасность работы при непосредственном контакте агрегатов и систем с водной средой. Некорректная оценка возможностей машины может привести к ее застреванию, повреждению или даже затоплению. Способность техники преодолевать водные преграды вброд без сложной дополнительной подготовки определяет тактическое преимущество и успех выполнения боевых и гражданских задач в сложной оперативной обстановке.

В России ежегодно на долю природных и техногенных катаклизмов, связанных с опасными гидрологическими явлениями (далее – ОГЯ), такими, как сильные паводки, половодья, нагонные наводнения и т.п., приходится около 30% от всех чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС). Для проведения работ в зонах затопления применяются ТТМ различного назначения, смонтированные в основном на базе самоходных колесных машин, однако системной оценки возможностей функционального применения ТТМ в таких условиях до настоящего времени не проводилось. В процессе работы в зоне затопления на эксплуатационные показатели ТТМ оказывают влияние такие неблагоприятные факторы, как глубина затопления, выталкивающая сила воды, скорость течения

водного потока и коэффициент сцепления движителя с донной опорной поверхностью. Анализ конструктивных особенностей машин, моделирование воздействия на них указанных факторов позволит определить фактические уровни их бродоходимости по показателям тягово-сцепных свойств и устойчивости, обосновать конструктивные требования по обеспечению работоспособности затопляемых систем, узлов и агрегатов, повысить объективность формирования состава группировок машин, привлекаемых к работе в зонах затопления, оперативность и качество выполнения ими задач по функциональному назначению.

Проведение экспериментальных исследований в данном направлении на натуральных образцах ТТМ сопряжено со сложностью их организации, значительными трудозатратами и высокими рисками. В связи с этим разработка метода оценки бродоходимости колесных ТТМ, основанного на математическом и имитационном моделировании, и проведении экспериментальных исследований на масштабных физических моделях машин является актуальной.

Степень разработанности темы. Оценке и научному обоснованию возможностей самостоятельного преодоления водных преград самоходными наземными транспортными средствами посвящено значительное количество разноплановых исследований, выполненных отечественными учеными. В работах В. А. Ткачева, А. Д. Фихта и А. В. Нагорных [1, 2] исследовались вопросы движения специальных гусеничных машин по дну водной преграды в подводном режиме. Движение по воде плавающих колесных и гусеничных машин, вопросы их плавучести, устойчивости и маневренности на плаву, входа и выхода из воды на берег рассматривается в трудах А. С. Антонова, П. В. Аксенова, Н. Л. Баулова, Ю. А. Кононовича [3, 4], В. И. Ладанова и А. С. Емельянчика [5 – 7], А. С. Бондарева, Н. Н. Болгова, В. Ф. Васильченков и С. С. Зиновьева [8, 9]. В исследованиях А. В. Шаховцева, О. А. Серякова, К. О. Серякова, М. А. Радченко, Т. А. Ивахненко и А. Сами [10, 11] рассмотрено движение специальных плавающих машин в условиях мелководных преградах при контакте их колесного движителя с донной опорной поверхностью. В исследованиях В. Н. Зузова, И. Ван

и В. Ичжоу [12 – 15] особое внимание уделяется созданию научно обоснованных методов проектирования легких и надежных кузовов скоростных амфибий, способных устойчиво воспринимать динамические нагрузки при эксплуатации на воде. В работах В. С. Макарова [16 – 21] общий фокус исследований лежит в области фундаментального понимания и практической оптимизации взаимодействия различных движителей с деформируемыми средами (снег, вода, болото, смеси) с целью повышения проходимости, эффективности и надежности снегоболотоходных машин. Работы сочетают фундаментальные исследования (гидродинамика, механика грунтов и снега) с прикладными задачами (классификация, разработка критериев оценки, проектирование). Исследования Д. Ю. Малахова и С. В. Зайцева [20 – 24] посвящены созданию научного фундамента и практических решений для высокоэффективных амфибийных транспортных средств, способных надежно преодолевать снежные, ледовые и водные преграды. Научные исследования возможности преодоления глубоководных бродов многоцелевыми автомобилями были проведены В. Н. Добромировым и С. М. Ломако [25].

Многочисленные современные зарубежные исследования взаимодействия наземных автотранспортных средств с водной средой связаны в основном с оценкой условий сохранения неподвижного состояния припаркованных легковых автомобилей в условиях их затопления движущимся водным потоком. Эти вопросы нашли отражение в трудах С. Shu, J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin, F. Y. Teo, Y. S. Liew, X. Xiao, Y. Wang [26 – 32], С. Arrighi, J. C. Alcèrrecа-Huerta, Н. Oumeraci, F. Castelli, M. Kramer, K. Terheiden, S. Wieprecht, E. Martinez-Gomariz, M. Gomez, B. Russo, S. Djordjević, M. Pregnolato, A. Ford, S. M. Wilkinson, R. J. Dawson [33 – 36] и др.

Таким образом, целевых исследований в части преодоления глубоководных бродов самоходными ТТМ на колесной базе до настоящего времени не проводилось, а уровни бродоходимости таких машин определяются конструктивной возможностью функционирования их узлов, систем и агрегатов в воде и не превышают 0,5 – 0,7 м.

Цель исследования – разработка метода оценки бродоходимости ТТМ в различных условиях среды затопления, основанной на математическом и физическом моделировании взаимодействия машин с водной средой и донной опорной поверхностью.

Объектом исследования является процесс движения колесной ТТМ вброд в зоне затопления.

Предметом исследования выступает научно-методический аппарат оценки и обоснования уровня бродоходимости ТТМ в различных условиях среды затопления.

Рабочая гипотеза. Расчетная оценка и прогнозирование возможности движения различных колесных ТТМ через водные преграды вброд может базироваться на едином методе оценки их бродоходимости, учитывающем изменение тягово-сцепных свойств машины из-за перераспределения нормальных реакций по ее колесам от гидростатического и гидродинамического воздействия водного потока.

Задачи исследования

1. Анализ применимости ТТМ для ликвидации последствий ОГЯ природного и техногенного характера.
2. Разработка математической модели движения колесной ТТМ вброд при работе в зоне затопления.
3. Программная реализация имитационных моделей затопления машины для определения объемного водоизмещения и ее движения в условиях водной среды вброд для определения коэффициентов сопротивления ТТМ.
4. Экспериментальные исследования параметров взаимодействия ТТМ с водной средой при движении вброд: объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления ТТМ в зависимости от уровня ее затопления и скорости течения водной преграды.
5. Разработка метода оценки бродоходимости колесных ТТМ.

Научная новизна исследования

1. Впервые разработана математическая модель движения колесной ТТМ при преодолении водной преграды, отличающаяся учетом совместного воздействия гидродинамических сил (лобового и бокового сопротивления), переменной выталкивающей силы в зависимости от глубины погружения, и взаимодействия колес с донным основанием, что позволяет достоверно прогнозировать критические режимы движения.

2. Предложены имитационные CAD/CFD-модели для расчетного определения гидродинамических и гидростатических характеристик ТТМ на основе пространственного обтекания, устанавливающие количественные зависимости коэффициентов сопротивления и объемного водоизмещения ТТМ от глубины погружения.

3. Экспериментально подтверждены расчетные коэффициенты гидродинамического сопротивления ТТМ на основе сравнительного анализа результатов численного моделирования с данными испытаний масштабных физических моделей, обеспечивающие допустимую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

4. Разработан комплексный метод оценки бродоходимости колесных ТТМ, интегрирующий результаты математического, имитационного моделирования и экспериментальных исследований, позволяющий прогнозировать предельную глубину преодоления водной преграды при заданной скорости ее течения с учетом характеристик донного основания и гидродинамических характеристик машины.

Теоретическая значимость работы

Расширена база знаний в сфере исследования бродоходных свойств самоходных колесных машин: предложена универсальная математическая модель взаимодействия колесной машины с водно-грунтовой средой при движении вброд; разработана и экспериментально подтверждена методика расчетного определения коэффициентов лобового и бокового гидродинамического сопротивления машины

в условиях изменяющихся параметров водной среды; разработан универсальный метод расчетного определения бродоходных свойств ТТМ.

Практическая значимость заключается в том, что разработанный методический аппарат позволяет объективно оценивать достижимые уровни бродоходности колесных ТТМ различного назначения и обосновывать требования к разработчикам техники по обеспечению работоспособности конструктивных элементов машин при их затоплении на заданную глубину. Одновременно метод предоставляет возможность разрабатывать рекомендации по безопасной эксплуатации серийных образцов техники в условиях зон затопления, учитывающие комплекс изменяющихся внешних факторов, включая глубину водной преграды, скоростные характеристики водного потока и физико-механические свойства донных грунтов.

Реализация результатов исследования. Научные результаты диссертационной работы были успешно использованы в ГНЦ ФГУП «НАМИ», где они были применены для разработки и обоснования требований к проходимости транспортных средств при преодолении водных преград вброд, а также для выбора конструктивно-компоновочных решений шасси и агрегатов с учетом обеспечения их работоспособности в условиях погружения в воду. Также результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)», которые были включены в дисциплины «Автотракторный транспорт» и «Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных дорожных средств и оборудования» для подготовки студентов по направлениям 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» со специализацией «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 15.04.03 «Прикладная механика».

Методология и методы исследования. Методология исследования представляет собой совокупность теоретических исследований, имитационного

моделирования и экспериментальных методов, обеспечивающих всестороннюю оценку бродоходимости колесных ТТМ и повышение точности ее результатов.

Теоретические исследования взаимодействия колесной машины с донной опорной поверхностью и водной средой основаны на работах в области теории движения колесных машин с использованием расчетных моделей, описывающих тягово-сцепные свойства, сопротивление качению и буксование в условиях преодоления брода.

С помощью систем автоматизированного проектирования (далее – CAD) и вычислительной гидродинамики (далее – CFD) выполнено компьютерное моделирование ТТМ и проведены комплексные виртуальные испытания в различных условиях воздействия водной среды. В качестве программного обеспечения использовались продукты «КОМПАС-3D» и ANSYS Fluent.

Экспериментальные методы включают гидростатические и аэродинамические испытания на физических масштабных моделях ТТМ, направленные на проверку разработанных виртуальных компьютерных моделей. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики, что позволило выявить устойчивые зависимости между конструктивными параметрами машины и ее бродоходимостью.

Положения, выносимые на защиту

1. Повышение достоверности оценки бродоходимости колесных ТТМ может быть достигнуто за счет применения математической модели движения машины в водной среде, учитывающей совместное воздействие гидродинамических сил, выталкивающей силы и взаимодействие колес с донным основанием.

2. Определение гидростатических и гидродинамических характеристик ТТМ (объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления) может быть осуществлено посредством имитационного моделирования взаимодействия с водной средой, устанавливающего количественные зависимости этих параметров от глубины погружения, скорости течения и пространственной ориентации машины.

3. Валидация имитационных моделей может быть осуществлена путем сравнительного анализа их и экспериментальных данных, полученных при испытаниях на масштабных физических моделях ТТМ.

4. Оценка предельной бродоходимости колесных ТТМ может быть осуществлена комплексным методом, интегрирующим результаты математического, имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, а именно: п. 1 «Теория рабочих процессов транспортно-технологических средств и их комплексов отраслевого назначения, включая транспорт, сельскохозяйственное, лесохозяйственное, дорожное, строительное, коммунальное, подъемно-транспортное, военное и т. д. (автомобилей, тракторов, амфибийных машин, мобильных роботов, планетоходов, подъемно-транспортных, строительных, дорожных, коммунальных машин, вспомогательного транспортно-технологического оборудования), взаимодействующих с опорной поверхностью – посредством контактных движителей и/или опорных, ходовых модулей (колесных, гусеничных, роторно-винтовых, шагающих, лыжных, воздушных подушек и др.) и с рабочими средами (объектами) – посредством навесного, прицепного и другого технологического оборудования»; п. 3 «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Достоверность исследования. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач, основанной на фундаментальных научных принципах, и применением современных методов математического моделирования. Научная обоснованность работы подтверждается использованием апробированных методик теоретического анализа и проведением серии контролируемых экспериментов в аэродинамической трубе для определения коэффициентов сопротивления ТТМ. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследований, демонстрируют высокую степень соответствия с расчетными

моделями, что верифицирует адекватность применяемого математического аппарата и достоверность выводов.

Апробация работы. Результаты отдельных этапов исследования были представлены автором в выступлениях и докладах на следующих научных конференциях: II и III международных научно-практических конференциях «Транспортная доступность Арктики: сети и системы», СПбГАСУ, Санкт-Петербург (2022, 2024 гг.); LXXV, LXXVI и LXXVII научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», СПбГАСУ, Санкт-Петербург (2022, 2023 и 2024 гг.); межрегиональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы судебных экспертиз и права в строительстве и на транспорте в условиях информатизации, цифровизации и высокотехнологического развития», СПбГАСУ, Санкт-Петербург (2022 г.); LXXVII и LXXVIII международных научно-практических конференциях «Архитектура, строительство, транспорт, экономика», СПбГАСУ, Санкт-Петербург (2023, 2024 гг.); XIV международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации», Москва (2023 г.); XVI международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» СПбГАСУ, Санкт-Петербург (2024 г.); международной научно-практической конференции «Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации», Симферополь, (2024 г.); V международной научно-практической конференции «Современные тенденции в научных исследованиях», Москва (2025 г.).

Личный вклад автора. Автором проведен всесторонний анализ современного состояния научных разработок в области бродоходимости ТТМ, послуживший основанием для систематизации существующих подходов и выявления перспективных направлений исследований. Обоснована актуальность создания научно-методической базы, позволяющей повысить эффективность применения ТТМ при выполнении строительных и аварийно-спасательных работ в зонах затопления. Автором разработана математическая модель прямолинейного

движения ТТМ при преодолении водной преграды по слабodeформируемому грунту. Автором созданы и реализованы оригинальные методики расчета объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления машины с применением имитационного моделирования взаимодействия с водной средой. При его непосредственном участии проведен комплекс экспериментальных исследований на физических масштабных моделях в аэродинамической трубе с целью определения гидродинамических характеристик ТТМ, обработаны и проанализированы их результаты. На основе комплексного анализа данных математического и имитационного моделирования, а также физических экспериментов разработан метод расчетной оценки бродоходимости ТТМ. Автором выполнено обобщение всех результатов исследования, проведена их верификация и сформулированы выводы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных статей, в том числе 5 – в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК РФ; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 188 использованных источников и 5 приложений. Объем диссертации составляет 218 страниц машинописного текста, включающего 151 страницу основного текста, 42 таблицы и 81 рисунок.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ БРОДОХОДИМОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

1.1 Обоснование научной и прикладной значимости исследований в области бродоходимости транспортно-технологических машин

Проходимость, как эксплуатационное свойство самоходной машины, принято подразделять на профильную, опорно-сцепную и бродоходимость. Возможность преодолевать неровности, препятствия и вписываться в заданную траекторию движения определяется профильной проходимостью транспортного средства (далее – ТС) [37, 38]. Опорно-сцепная проходимость определяет возможность ТС двигаться в усложненных дорожно-грунтовых условиях по грунтам с низкой несущей способностью и/или с малыми коэффициентами сцепления колес с опорной поверхностью [37]. Бродоходимость определяется возможностью самостоятельного преодоления машиной водной преграды по опорной поверхности ее дна.

В процессе эксплуатации ТТМ нередко возникает необходимость форсирования водных преград различного типа, включая реки, каналы, водохранилища, озерные акватории и морские проливы [1]. С технической точки зрения преодоление подобных препятствий может осуществляться одним из трех базовых способов: движение вброд по дну преграды, подводное перемещение или движение машины вплавь [2]. Для самоходных колесных машин, в зависимости от их целевого назначения и конструктивного исполнения, нормативно закрепляется способность к преодолению водных преград либо методом брода, либо за счет амфибийных качеств [39]. В этой связи, ключевым эксплуатационным свойством, определяющим подвижность ТТМ в условиях водных преград, выступает показатель бродоходимости, характеризующий предельную глубину и скорость течения, допустимые для безопасного форсирования.

Водные преграды вброд могут преодолевать машины повышенной проходимости, предназначенные для использования как по дорогам, так и вне их [37], к которым относятся полноприводные ТС с колесным двигателем и машины на гусеничном ходу.

Важной особенностью различных территорий многих стран является широкая сеть многочисленных водных преград с различными характеристиками и это обстоятельство необходимо учитывать при проведении предупредительных, ликвидационных, неотложных и восстановительных мероприятий подразделениями Министерства чрезвычайных ситуаций (далее – МЧС) и нештатных аварийно-спасательных формирований (далее – НАСФ), привлекаемых к решению задач в зонах повышенного уровня воды [5]. Поэтому важное значение имеет приспособленность всех видов сухопутных ТС к самостоятельному преодолению водных преград, поскольку современный опыт ЧС, связанных с ОГЯ, не позволяет рассчитывать на широкое использование переправочных средств [6]. Неправильная оценка возможностей ТТМ по преодолению водной преграды может привести к застреванию, повреждению техники или даже ее затоплению. В наибольшей степени такие риски относятся к колесным самоходным ТТМ. В этой связи разработка универсального метода расчетной оценки бродоходимости колесных машин, учитывающего все необходимые научно обоснованные параметры взаимодействия их с водно-грунтовой средой, является важной задачей для повышения эффективности и безопасности применения такой техники в условиях затопления. Таким образом, исследование в области бродоходимости колесных ТТМ является актуальной научной задачей.

1.2 Анализ современных чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными гидрологическими явлениями

Среди ЧС природного характера лидирующую позицию по частоте возникновения, масштабам распространения и величине наносимого материального ущерба занимают ОГЯ, в частности наводнения [40, 41]. Согласно

прогноznым оценкам, представленным в работах [42, 43, 44], к середине XXI века ожидается девятикратное увеличение частоты катастрофических разливов, что актуализирует задачи разработки эффективных механизмов противодействия.

Опасность наводнений определяется рядом взаимосвязанных факторов, главные из которых: генезис и периодичность, интенсивность гидродинамического воздействия водных масс, а также пространственный масштаб и величина нанесенного материального ущерба [45].

Сущность наводнения как деструктивного процесса заключается в продолжительном затоплении обширных участков местности, преимущественно в поймах рек и прибрежных зонах озерных систем. Данный процесс сопровождается масштабными повреждениями объектов инфраструктуры, критическими нарушениями жизнеобеспечения населения, значительными экономическими потерями и представляет непосредственную угрозу жизни людей, в наиболее тяжелых случаях приводя к массовой гибели населения [46].

К основным гидрологическим процессам, инициирующим затопление, относятся половодья, паводки различного происхождения, образование ледовых заторов и зажоров, а также подъем уровня подземных вод, обусловленный как естественными, так и антропогенными факторами [45, 46, 47].

Согласно оценочному докладу Межправительственной группе экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК) [48] все компоненты глобального водного цикла к настоящему времени изменились из-за изменения климата за последние десятилетия. Обширные записи с метеостанций, спутников и радаров ясно показывают, что характер осадков изменился во всем мире.

По данным Центра исследований эпидемиологии катастроф (далее – Центр), наводнения неизменно остаются самым распространенным стихийным бедствием, составляя около 40% всех зарегистрированных случаев в мире. Специалисты Центра в своих ежегодных отчетах отмечают, что в течение этого периода ежегодно фиксировалось около 150 – 200 крупных наводнений [49]. По данным Управления ООН по снижению риска стихийных бедствий, в период с 2014 по 2023 год от наводнений пострадали более 1,47 миллиарда человек по всему миру. В это

число входят те, кто столкнулся с проблемой перемещения, потери имущества и лишения средств к существованию [50]. Только в 2022 году наводнения затронули более 50 миллионов человек по всему миру, причем наиболее значительные события произошли в таких странах, как Пакистан, Индия и Бангладеш [50]. Экономический ущерб от наводнений является весьма значительным, по разным оценкам, от 30 до 100 миллиардов долларов в год, в зависимости от тяжести событий [51]. Антропогенные изменения климата способствуют увеличению вероятности экстремальных осадков, что, в свою очередь, ведет к возрастанию как частоты, так и масштабов этих паводков [48].

В период с 1970 по 2019 год 44% всех бедствий и 31% всех экономических потерь были связаны именно с наводнениями [52]. В таблице 1.1 представлены крупные бедствия, связанные с сильными осадками с 2014 по 2021 год, которые привели к наводнениям, и их последствия в разных странах.

Таблица 1.1 – Крупные бедствия, связанные с сильными осадками с 2014 по 2023 год, которые привели к наводнениям, и их последствия в разных странах [48]

Год	Страна/Регион	Последствия
2014	Индонезия (Джакарта)	26 погибших, тысячи зданий под водой. Ущерб: ~\$384 млн [48,53].
2015	Индия (Ченнаи)	Объявлена ЧС. Ущерб: \$3 млрд [48, 54].
2016	Южный Китай	Ущерб: ~\$7,5 млрд [48, 55].
	Китай (г.Ухань)	237 погибших, 93 пропали без вести. Ущерб: ≥\$22 млрд [48].
	Китай (р. Янцзы)	Прямой ущерб: ~\$10 млрд [48, 56].
	Австралия	Ущерб сельскому хозяйству и энергетике. Ущерб: ~\$1,1–1,5 млрд [48, 57].
2017	Перу	Затронута 1,7 млн человек, 177 погибших. Ущерб: \$3,1 млрд [48, 58].

Год	Страна/Регион	Последствия
2017	Уругвай и Бразилия	Убытки в Бразилии: \$102 млн, эвакуировано >3500 человек в Уругвае [48, 59].
	Северо-Восточный Бангладеш	Ущерб: \$1,2–1,5 млрд, затронуто ~8 млн человек [48, 60].
2018	Китай	Пострадало 7,8 млн человек, 34 погибших, эвакуировано 800 тыс. Ущерб: ~\$3,6 млрд [48, 61].
	США (Среднеатлантический регион)	Ущерб: \$2,1–2,4 млрд [48, 62].
	Центральный и Западный Китай	Затронуто 2,9 млн человек. Ущерб: >\$1,3 млрд [48, 63].
	Северо-Западный Китай	Ущерб: \$3,2–3,8 млрд [48, 64].
	Япония	Рекордные осадки. Ущерб за 30 лет: \$9,1–11,5 млрд [48, 65].
	Австралия (Тасмания)	Страховые убытки: \$100 млн, массовая эвакуация [48, 66].
2019	Канада (Оттава)	Страховые убытки: ~\$200 млн. [48, 67].
	Южный Китай	Затронуто >6 млн человек, 91 погибший. Ущерб: ~\$3 млрд [48, 68].
2021	Германия, Бельгия и др.	Катастрофические наводнения в Европе. Ущерб: \$40–54 млрд [48, 69].
2022	Пакистан	Ущерб: \$30–32 млрд (~10% ВВП) [48, 70].
2023	Бразилия (Сан-Паулу)	Ущерб: \$1,5–2,1 млрд [71].

Согласно существующим научным прогнозам, частота и масштабы речных наводнений изменяются в глобальном масштабе. Ожидается, что их частота

увеличится во многих регионах, включая Азию, Центральную Африку, Западную Европу, Центральную и Южную Америку, и восточную часть Северной Америки, и уменьшится в северной части Северной Америки, Средиземноморье и восточной Европе к 2050 году и в последующий период [70, 72]. На рисунке 1.1 представлена смоделированная средняя глубина воды глобального речного паводка на основе моделей поверхности суши, рек и затоплений.

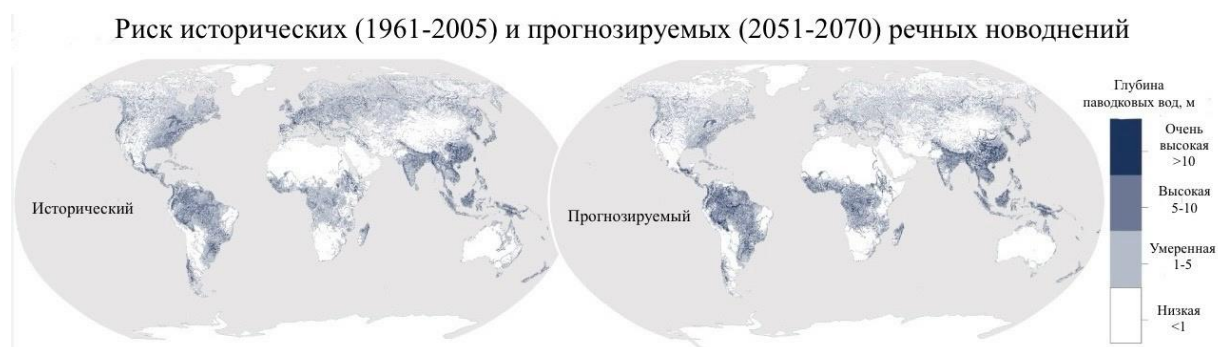


Рисунок 1.1 – Смоделированная средняя глубина воды глобального речного паводка на основе модели поверхности суши и модели рек и затоплений [48, 73, 74]

Существуют и специфические причины наводнений. Такие страны, как Индия, Бангладеш и Пакистан, особенно уязвимы к наводнениям из-за муссонных дождей и речных паводков [75]; страны Восточной Африки – Кения и Сомали сталкиваются с периодическими наводнениями, усугубляемыми изменением климата и явлениями Эль-Ниньо [75]; страны Юго-Восточной Азии, такие как Вьетнам и Таиланд, часто страдают от наводнений, вызванных проливными дождями и тайфунами [76].

В Российской Федерации к регионам, подверженным паводковым наводнениям, относятся бассейны рек Амур, Енисей, Нижней Волги, а также водоемы Сахалина, Забайкалья, Среднего и Южного Урала, Северного Кавказа и Северо-Запада европейской части страны. Суммарная площадь территорий, подверженных воздействию паводковых явлений и наводнений, достигает приблизительно 400 000 км². Катастрофические затопления территорий приводят к системным негативным последствиям в различных отраслях народного хозяйства.

Наблюдается значительное воздействие на населенные пункты, объекты социальной инфраструктуры, сельскохозяйственные угодья и природные экосистемы. Отмечаются масштабные повреждения элементов транспортно-дорожной сети, включая деформации дорожного полотна, разрушения опорных конструкций мостов и тоннелей, а также повреждения строительных конструкций зданий и сооружений. Существенные нарушения возникают в системах энергообеспечения и других видах инженерных коммуникаций.

Особую категорию представляют наводнения с катастрофическими последствиями, охватывающие территорию приблизительно 150 000 км². В зонах подобных затоплений сосредоточено около 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, многочисленные объекты критической инфраструктуры и свыше 7 миллионов гектаров земель сельскохозяйственного назначения, что актуализирует разработку комплексных мер по повышению устойчивости территорий к воздействию паводковых явлений [41, 46, 77]. На рисунке 1.2 изображена карта-схема распределения рисков возникновения ЧС, связанных с ОГЯ [78].

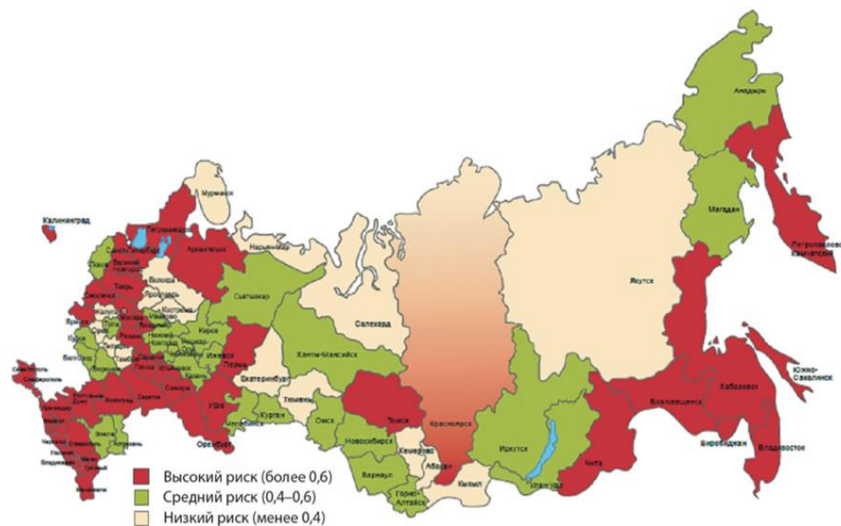


Рисунок 1.2 – Карта-схема распределения рисков возникновения ЧС, связанных с ОГЯ [78]

При анализе частоты ЧС, вызванных ОГЯ за 2008 – 2024 гг., использовались данные государственных докладов о защите населения и территорий РФ от ЧС

[78 – 91]. Анализ затоплений за 2013 – 2020 гг. проведен на основе материалов исследования [81].

На основе проанализированных данных получены графики, отображающие общее количество ЧС, связанных с ОГЯ, и количество затоплений за соответствующие периоды (рисунки 1.3 и 1.4).

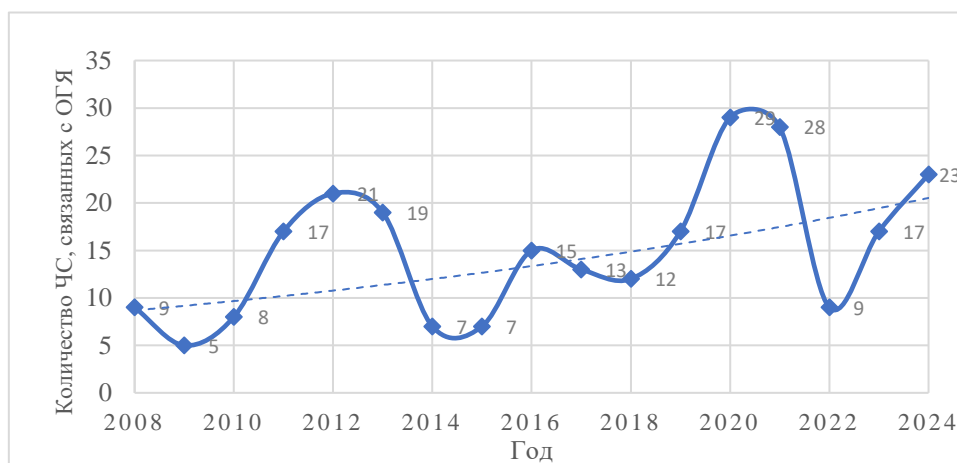


Рисунок 1.3 – Динамика числа чрезвычайных ситуаций, вызванных опасными гидрологическими явлениями, на территории РФ в период с 2008 по 2024 гг.

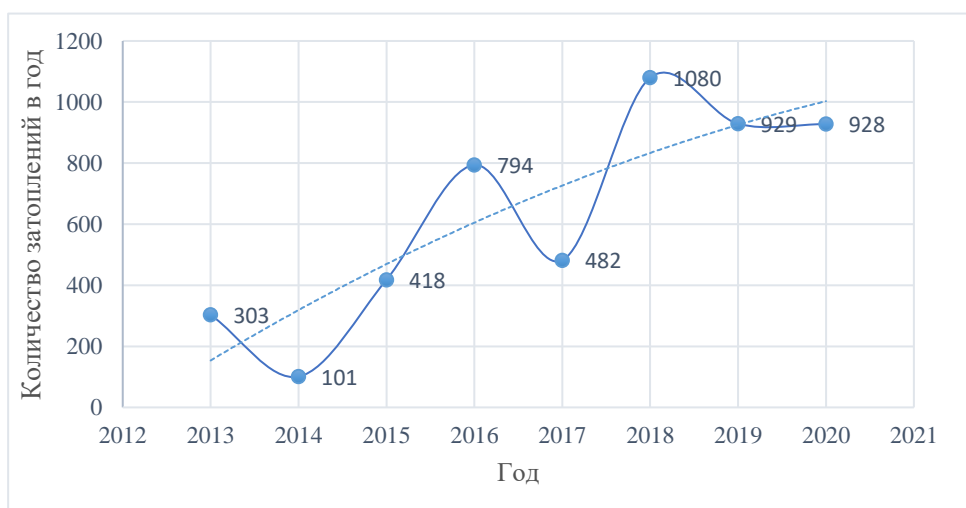


Рисунок 1.4 – Колебания числа затоплений на территории РФ в период с 2013 по 2020 гг.

Анализ данных выявил значительные колебания ежегодных показателей: количество ЧС природного характера варьировалось от 5 до 28 случаев, в то время

как число затоплений достигало 100 – 1080 случаев в год [81]. Установлено, что основными причинами затоплений являются паводки и экстремальные осадки [40].

Проведенный анализ свидетельствует, что затопления в России происходят с регулярной периодичностью (ежегодно). Только за последние 5 лет количество затоплений увеличилось примерно в 1,5 раза, что, в свою очередь, приводит к росту масштабов ущерба для инфраструктуры и увеличению объема работ по ликвидации последствий и восстановлению поврежденных объектов [41]. Объем поврежденной инфраструктуры в результате затоплений на территории РФ в период с 2013 по 2020 годы представлен на рисунках 1.5 и 1.6.

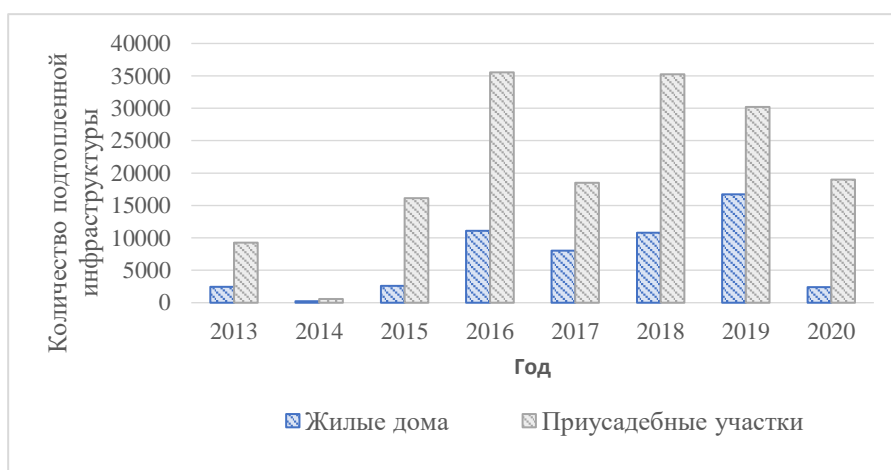


Рисунок 1.5 – Количество подтопленной инфраструктуры (жилые дома, приусадебные участки) на территории РФ в период с 2013 по 2020 гг.

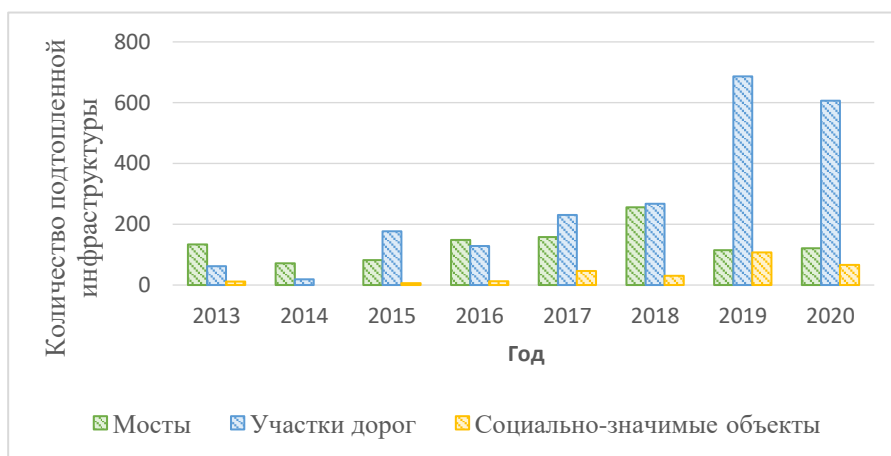


Рисунок 1.6 – Количество подтопленной инфраструктуры (мосты, участки дорог, социально-значимые объекты) на территории РФ в период с 2013 по 2020 гг.

Согласно рисункам 1.5 и 1.6, наиболее уязвимыми при затоплениях элементами инфраструктуры являются участки дорог и приусадебные территории. Затопление дорог значительно ограничивает доступ к пострадавшим районам, что требует использования аварийно-спасательной и другой специализированной техники для преодоления затопленных участков.

На основе данных исследования [78 – 89] был построен график нанесенного материального ущерба ЧС, связанными с ОГЯ, в период с 2014 по 2022 гг., изображенный на рисунке 1.7.

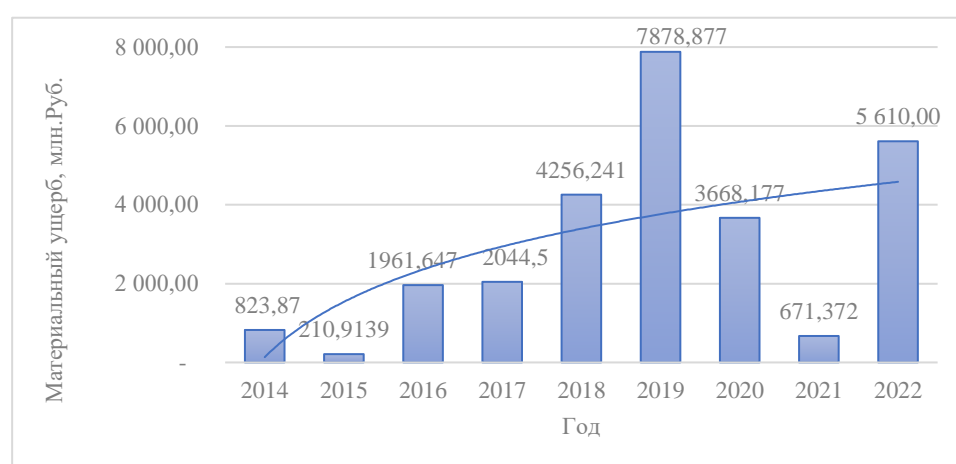


Рисунок 1.7 – Изменение материального ущерба с 2015 по 2022 гг.

Из рисунка 1.7 видно, что размер материального ущерба от наводнений ежегодно различен, однако имеется тенденция его роста в перспективе.

Таким образом, складывающаяся ситуация ставит перед МЧС и местными властями задачу превентивного планирования мероприятий по предупреждению, ликвидации и оказанию экстренной помощи в затопленных районах.

1.3 Исследование зарубежного и отечественного опыта предотвращения и ликвидации последствий затопления жилых зон и объектов транспортной инфраструктуры

В разных странах эффективно реализуются стратегии предотвращения и смягчения последствий наводнений на транспортной инфраструктуре и в жилых районах.

В рамках международных инициатив, таких как Программа ООН по окружающей среде, страны разрабатывают и внедряют стратегии, направленные на улучшение управления водными ресурсами и снижение уязвимости к наводнениям.

В Германии и Сингапуре реализованы проекты по восстановлению экосистем, способствующие управлению ливневыми водами и предотвращению наводнений через создание водоемов и восстановление болот, что обеспечивает естественное регулирование водного баланса [92]. В Нидерландах необходимость защиты от морских приливов и речных наводнений, а также традиция осушения неглубоких морских зон привели к развитию сложной гидротехнической инфраструктуры. Общая длина защитных дамб составляет 3500 км, включая 1430 км речных, 1017 км озерных дамб, а также береговые дамбы и дюны [92]. В настоящее время в Нидерландах применяются современные методы защиты от наводнений, включая усовершенствованные насосы и инновационные технологии строительства, что позволило реализовать уникальные проекты, такие как «Зейдерзе» и «Дельта» [92, 93]. Также активно используются мобильные барьеры для быстрой защиты жилых районов и инфраструктуры. Примером такого решения является проект "Storm Surge Barrier" в Роттердаме, использующий подъемные конструкции для защиты от штормовых наводнений [94].

Для защиты Лондона от катастрофических наводнений в устье реки Темзы, впадающей в Северное море, был построен специальный барьер. Его длина составляет 522 метра, а русло перекрыто несколькими судоходными пролётами различной ширины [95, 96, 97].

Япония один из мировых лидеров по борьбе с наводнениями, обусловленных ее географическим положением [98] и входит в число пяти государств с наибольшим количеством плотин. Основной целью их строительства является борьба с наводнениями, ведь почти 50% населения страны проживают на территории с высоким риском затопления.

Также в Японии применяется противопаводковая система, т.е. комплекс искусственных сооружений, призванные аккумулировать излишки поступающей воды [99].

Китай активно борется с наводнениями, вызванные ежегодными паводками, разливами крупных рек Янцзы, Лао, Сунгари [97]. Система борьбы с наводнениями в нижнем течении р. Янцзы, включает в себя дамбы обвалования, регуляционные работы в русле реки, создание паводкораспределительных и паводкоаккумулирующих районов, водохранилищ на притоках [98, 99].

В США меры по ликвидации последствий ЧС осуществляют органы гражданской обороны, Министерство здравоохранения, Национальная противопожарная администрация, медицинская служба Вооруженных сил. Основным органом, ответственным за управление чрезвычайными ситуациями в стране, является Федеральное агентство по управлению в области чрезвычайных ситуаций (Federal Emergency Management Agency – FEMA), которое подчиняется президенту [98, 99, 100]. В США, особенно в таких штатах, как Луизиана, были построены дамбы и защитные сооружения для предотвращения наводнений. После урагана Катрина в 2005 году были реализованы масштабные проекты по укреплению и модернизации дамб, что позволило значительно снизить риск затопления [101].

В районе Большого залива Гуандун-Гонконг-Макао разработаны стратегии для смягчения последствий наводнений на транспортную инфраструктуру. Эти стратегии акцентируют внимание на интеграции зеленой инфраструктуры, что позволяет улучшить управление ливневыми водами и повысить устойчивость к наводнениям [102].

В Филиппинах проведены исследования, которые подчеркивают важность подготовки к бедствиям и устойчивости сообществ в зонах, подверженных наводнениям. Успешные практики включают обучение местных жителей методам предотвращения и реагирования на наводнения, что значительно снижает риски и последствия [103].

Стоит отметить, что все имеющиеся противопаводковые сооружения имеют свой срок службы. Они требуют регулярного ухода, ремонта и мониторинга [90].

Водоохранилища и защитные дамбы критически важны для регулирования паводков, особенно трансграничных. Несмотря на разный принцип действия

(первые накапливают воду, вторые – увеличивают скорость её стока), оба типа сооружений значительно меняют характеристики половодья и могут иметь серьёзные последствия для соседствующих стран [80].

Для снижения рисков и минимизации последствий наводнений проводятся различные организационные и инженерно-технические мероприятия. Среди них — укрепление гидротехнических сооружений, строительство дополнительных дамб и валов для сдерживания водных потоков, создание запасов аварийных материалов для ликвидации прорывов, повышение высоты плотин и дамб, а также подготовка плавсредств для экстренной эвакуации. Кроме того, выделяются транспортные средства для эвакуации населения и ценного имущества [104, 105].

Использование специальной техники при ликвидационных и восстановительных работах в зонах затопления в зарубежных странах зависит от различных факторов, таких как масштаб наводнения, тип местности, уровень повреждений и доступность ресурсов. Типовые рекомендации по ее применению приведены ниже.

1. Откачка воды проводится при сильных наводнениях, когда затоплены улицы, здания и подземные сооружения. В качестве используемой техники применяются мобильные насосные станции, дренажные насосы [106].

2. Расчистка и восстановление инфраструктуры производятся после наводнений, когда дороги, мосты и другие объекты инфраструктуры повреждены или заблокированы. Для этих работ используют экскаваторы, бульдозеры и грейдеры [107].

3. Устранение последствий загрязнения производится с помощью специальных машин для очистки и вакуумных машин, когда наводнение приводит к разливу химических веществ, сточных вод или других загрязняющих веществ. Например, в Италии, после наводнений в Венеции, использовались специальные машины для очистки каналов от мусора и загрязнений, чтобы предотвратить экологическую катастрофу [108].

4. Укрепление берегов и защитных сооружений при угрозе повторных наводнений или при необходимости восстановления дамб и других защитных

сооружений. Для этого используются гусеничные и колесные экскаваторы, бульдозеры, машины для укладки геотекстиля [109].

5. Доступ к труднодоступным районам, когда наводнение затопило удаленные или труднодоступные районы, где обычная техника не может проехать. В таких условиях применяются гусеничные машины и амфибии [110].

Водная конвенция требует, чтобы страны-участники сотрудничали друг с другом в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и обменивались информацией об изменении объема, уровня и количества воды в реках, озерах, водохранилищах и т.п.

В России взаимодействие с иностранными специалистами организуется региональным центром или областной Комиссией ЧС, на территории которых предусматривается их действия на основе межгосударственного соглашения, в соответствии с которым указанные специалисты прибыли для ликвидации ЧС [108].

Большинство ЧС, связанных с затоплениями, сложно предотвратить, из чего следует, что формирования МЧС должны иметь высокий уровень подготовки и эффективное материально-техническое обеспечение для качественного и оперативного выполнения возникающих задач [110, 111].

1.4 Анализ номенклатуры машин, применяемых для аварийно-спасательных и других неотложных работ

Успех аварийно-спасательных работ (далее – АСР), при наводнениях во многом зависит от оснащённости подразделений современной техникой. Используемое оборудование должно обладать высокой мобильностью, технической надёжностью и эксплуатационной производительностью [109]. Эти качества являются определяющими для соответствия комплексу организационно-технологических требований к проведению АСР, включающих: оперативность развертывания, бесперебойность функционирования, всепогодность применения,

высокий темп ведения работ и максимальную эффективность выполнения задач в экстремальных условиях [40, 109].

Современные защитные мероприятия против затоплений делятся на два типа: предупредительные (инженерные) и оперативные, проводимые в условиях уже возникшего затопления [112, 113, 114, 115].

К предупредительным мерам, при которых задействуются ТТМ, относятся инженерно-технические методы защиты. Эти методы включают комплекс организационных, социально-правовых и технических мероприятий, направленных на регулирование, задержание или отвод максимальных водных потоков с целью предотвращения затоплений, подтоплений, оползней и разрушений берегов [116, 117]. Инженерно-технические мероприятия при этом, выполняемые с использованием ТТМ, включают в себя:

— строительство и эксплуатацию различных гидротехнических сооружений, таких как дамбы, обвалования, системы дренажа, водосбросные сети, нагорные каналы, быстрые потоки, перепады трубопроводов и насосные станции [117];

— проведение работ по улучшению русел рек, направленных на повышение их водопрпускной способности, включая углубление, спрямление и расширение;

— выполнение земляных работ на поймах, способствующих снижению площади затопления, таких как подсыпка грунта, дренаж затопляемых территорий и укрепление берегов и пойменных террас [118, 119].

Одним из самых эффективных методов борьбы с наводнениями является строительство водохранилищ [120]. Наиболее значительные водохранилища расположены на р. Обь (Новосибирское), Енисей (Саяно-Шушенское, Красноярское) и Ангара (Иркутское, Братское, Усть-Илимское, Богучанское) [45, 112].

Заблаговременные гидротехнические мероприятия по предотвращению распространения водных потоков за пределы водоемов значительно повышают эффективность защиты населения от последствий затоплений [103, 112].

К оперативным мероприятиям при ликвидации последствий затоплений относятся разведывательные, ликвидационные и неотложные аварийные работы. ТТМ выступают в качестве ключевого средства технического обеспечения наземной инженерной разведки, основной целью которой является комплексная оценка оперативной обстановки в зоне затопления. В задачи разведки входит определение видов и объемов работ по деблокированию пострадавших, их спасению и эвакуации, а также выявление и предотвращение вторичных угроз, включая пожары, разрушения строительных конструкций, химическое загрязнение окружающей среды, оползневые процессы и обрушения инфраструктурных объектов [40].

Особое внимание в ходе инженерной разведки уделяется диагностике состояния дорожной инфраструктуры: оценке несущей способности земляного полотна подъездных путей, проверке целостности и грузоподъемности мостовых сооружений и тоннелей с целью определения возможности их использования для прохождения спасательной техники [40, 111].

К ликвидационным и неотложным мероприятиям оперативного реагирования относятся [118]: восстановление, усиление и капитальный ремонт поврежденных гидротехнических сооружений; ликвидация заторных и зажорных явлений на водных объектах; обустройство причальных фронтов для обеспечения доставки грузов водным транспортом; восстановление разрушенных инженерных коммуникаций, линий связи и систем энергоснабжения; строительство колонных путей; организация временных проездов и проходов в зонах подтопления; аварийное укрепление или демонтаж строительных конструкций, представляющих угрозу обрушения и препятствующих безопасному проведению поисково-спасательных операций; локализация источников вторичных угроз [40].

Таким образом, можно заключить, что ТТМ играют ключевую роль в решении разнообразных задач в условиях затопления.

Основу инженерно-технического обеспечения механизации работ при вводе формирований МЧС в зону поражения составляют специализированные ТТМ: путеукладчики, бульдозеры колесные и гусеничные, экскаваторы

универсального назначения, краны автомобильные, автогрейдеры, скреперы, автосамосвалы, а также другие виды специальной техники, обеспечивающие оперативную эффективность проведения аварийно-спасательных операций [119, 120].

В зависимости от назначения, машины можно разделить на две группы:

- машины для преодоления препятствий, завалов и разрушений, которые отбираются из средств инженерного вооружения;
- машины для ремонта, укрепления и обслуживания существующих дорог, мостов и тоннелей, отбираемые из серийно выпускаемой народнохозяйственной техники.

Краны в зоне затопления используются для удаления конструкций, которые представляют угрозу обрушения в ходе проведения аварийно-спасательных операций. Погрузчики применяются для расчистки проезжих путей, обеспечивая проезд специализированной техники, а также для удаления крупных обломков строительных конструкций. Тракторы, благодаря возможности установки разнообразного навесного оборудования, способны эффективно решать широкий спектр задач, включая очистку дорог и работу с завалами. Экскаваторы используются для расчистки завалов и подъема обломков, в том числе из подвальных помещений. Автовышки играют ключевую роль в обеспечении отключения токоведущих линий, спиливании арматуры и других конструкций, создающих угрозу безопасности, а также в выполнении работ по спилу деревьев и подъему спасателей на крыши зданий, а также транспортировке инструментов на высоту [121].

Универсальные экскаваторы и путепрокладчики, действующие в условиях повышенного уровня воды, способны выполнять широкий круг работ [122]. К ним относится засыпка воронок на дорогах, восстановление поврежденного земляного полотна, выравнивание неровностей и удаление кустарников при прокладке колонных путей, а также создание съездов и переездов через препятствия, такие как канавы и овраги. Эти машины также применяются для организации проходов

через лесные и каменные завалы и для укладки kolejных покрытий и мостов, что обеспечивает преодоление заболоченных участков и малых рек.

Для выполнения работ по прокладке путей используются как гусеничные, так и колесные шасси, на которые устанавливаются различные виды рабочего оборудования, включая бульдозерное, крановое и другие типы. Колесные шасси, хотя и обладают несколько меньшими характеристиками проходимости и тягово-сцепными свойствами по сравнению с гусеничными, обеспечивают более высокую скорость передвижения и имеют более длительный срок службы ходовой части, что особенно важно в условиях сезонных паводков [121, 123].

Бульдозеры являются многофункциональными машинами, предназначенными для выполнения земляных и транспортных работ в зонах затопления. Они используются для засыпки рвов, воронок и траншей, создания проходов, разборки завалов в местах разрушений, разработки грунта и его погрузки в транспортные средства, а также для валки деревьев и корчевания пней [122, 123]. Например, при разборке завалов в зоне затопления необходимо использование экскаваторов с традиционным рабочим оборудованием и грузоподъемная техника, а именно кранов, для подъема более крупных обломков, деревьев, камней, которые не помещаются в ковш экскаватора. При наличии такой техники организация работ заключается в последовательном использовании экскаваторов, оснащенных гидромолотом и обратной лопатой, и грузоподъемного крана. Также целесообразно в данном случае применение погрузчиков, которые позволяют сократить число грузоподъемной техники и устранить необходимость ручной строповки захватываемых обломков [121].

В соответствии с изложенным, стратегическими направлениями развития технического обеспечения аварийно-спасательных формирований являются создание и модернизация специализированных машин, соответствующих следующим фундаментальным требованиям [124]:

- функциональная универсальность или целевая специализация в зависимости от оперативных задач;
- минимальное время приведения в рабочее состояние и развертывания;

- оснащение современными высокотехнологичными инструментальными комплексами и оборудованием для оказания экстренной помощи пострадавшим и выполнения неотложных аварийных работ;
- высокая надежность шасси, обеспечивающая запас хода не менее 500 км;
- отличные эксплуатационные характеристики, включая высокую скорость, проходимость и маневренность в различных дорожных и природно-климатических условиях;
- способность функционировать в автономном режиме [125].

На рисунках 1.8 – 1.11 изображены примеры движения колесной техники через водную преграду вброд по донному основанию. На рисунке 1.12 изображена совместная работа погрузчика и самосвала в зоне затопления.



Рисунок 1.8 – Движение многоцелевого автомобиля через водную преграду вброд по донному основанию



Рисунок 1.9 – Движение специальных автомобилей МЧС через водную преграду вброд



Рисунок 1.10 – Движение экскаваторов-погрузчиков через мелководную преграду вброд



Рисунок 1.11 – Движение экскаваторов-погрузчиков через водную преграду вброд по донному основанию



Рисунок 1.12 – Совместная работа погрузчика и самосвала в зоне затопления

В методических рекомендациях по созданию и применению нештатных аварийно-спасательных формирований приводится примерный перечень создаваемых НАСФ на базе различных организаций. Данный перечень представлен в таблице 1.2 для различных организаций команд аварийно-спасательных формирований.

По данным таблицы 1.2 можно выделить пять наиболее часто применяемых видов специальной техники, а именно бульдозеры, экскаваторы, автокраны, погрузчики, грузовые автомобили. Оценка условий сохранения подвижности этих машин в водной среде при всестороннем воздействии ее факторов экспериментальным путем является проблематичной из-за высоких рисков затопления и опрокидывания машин. Современные расчетно-вычислительные методы позволяют с достаточной достоверностью моделировать взаимодействие ТТМ с водно-грунтовой средой при преодолении глубоководных бродов, что подтверждается результатами исследований в части многоцелевых автомобилей [12]. Для решения подобной задачи в части ТТМ проведено обоснование выбора машины-прототипа для математического моделирования.

Таблица 1.2 – Рекомендованный перечень специальных технических средств для оснащения аварийно-спасательных формирований

Наименование	Виды формирований								
	Организация сводной команды (территориальной)	Организация сводной команды (организации)	Сводная команда механизации работ	Организация команды по ремонту	Организация водопроводных и теплосетей	Организация команды по организации защиты и эвакуации материальных и культурных ценностей	Организации команды связи	Организация подвижной ремонтно-восстановительной группа по ремонту автомобильной, инженерной и др. техники	Организация эвакуационной группы
	Количество								
Личный состав	119	107	94	108	59	41	25	20	12
Техника									
Бульдозер	1	1	4	2	1	–	–	–	–
Экскаватор	1	–	4	–	2	–	–	–	–
Автокран	1	1	4	2	1	1	–	–	2
Погрузчик	1	–	2	2		2	–	–	–
Бурильная машина	1	–	1	2		–	–	–	–
Ремонтно-водопроводная машина	1	–	1	–	1	–	–	–	–
Грузовой автомобиль	4	5	6	3	1	3	1	2	–

1.5 Обоснование выбора машины-прототипа для математического моделирования

Для создания математической модели движения ТТМ вброд, необходимо определить тип ТТМ, вид движителя, приводность, количество рабочих органов, тяговое усилие [41, 126].

С позиции теории проходимости ТТМ эффективное функционирование техники в зонах затопления определяется комплексом специальных эксплуатационных свойств. Критически важными из них являются:

- повышенная подвижность, обеспечиваемая опорной и профильной проходимостью, быстроходностью, управляемостью, курсовой устойчивостью и оперативной автономностью;
- надежность функционирования в условиях водонасыщенных грунтов и гидродинамических воздействий;
- оперативная мобильность при передислокации в зоны бедствия;
- функциональная универсальность при выполнении задач различной природы;
- эргономическая обитаемость для длительной работы экипажа в экстремальных условиях.

С точки зрения эффективности выполнения разнородных задач в условиях затоплений, наилучшую приспособленность демонстрируют экскаваторы-погрузчики. Их конструктивный потенциал позволяет путем применения быстросменного навесного оборудования адаптироваться к широкому спектру операций – от землеройных работ до грузоперемещения и проведения аварийных мероприятий.

Основные конструктивные исполнения экскаваторов-погрузчиков можно классифицировать по типу движителя: колесные (в том числе на шинах сверхнизкого давления) и гусеничные. По типу размера колес: разновеликие и равновеликие.

Ниже приведены преимущества экскаватора-погрузчика.

1. Мобильность и маневренность. Благодаря компактным габаритам, колесному движителю и высокой скорости данная техника может оперативно передвигаться своим ходом с объекта на объект.

2. Универсальность. Машина способна заменить несколько единиц техники, что является экономией в плане технических расходов, а также в плане комплектования персонала операторов.

3. Высокая проходимость. Обеспечивается высокая доступность полноприводной машины с крупногабаритными равновеликими колесами к месту проведения работ в труднопроходимых условиях.

4. Производительность. Показатели производительности уступают полноразмерным экскаваторам или фронтальным погрузчикам, однако они вполне достаточны для решения широкого спектра задач в зонах затопления.

К эксплуатационным ограничениям рассматриваемого класса машин следует отнести ряд конструктивных и функциональных особенностей. К числу наиболее значимых относятся: ограниченный обзор из кабины оператора, высокая сложность системы управления, обусловленная применением многочисленных электронно-управляемых систем, а также повышенные требования к квалификации операторского состава.

Исследование динамики продаж ТТМ за период 2013–2023 годов позволило выявить основные типы техники, пользующиеся наибольшим спросом в отрасли. Согласно данным Ассоциации европейского бизнеса (рисунок 1.13), за указанный период в Российской Федерации было реализовано 32 340 единиц экскаваторов-погрузчиков, что составляет 25% от общего объема продаж ТТМ.

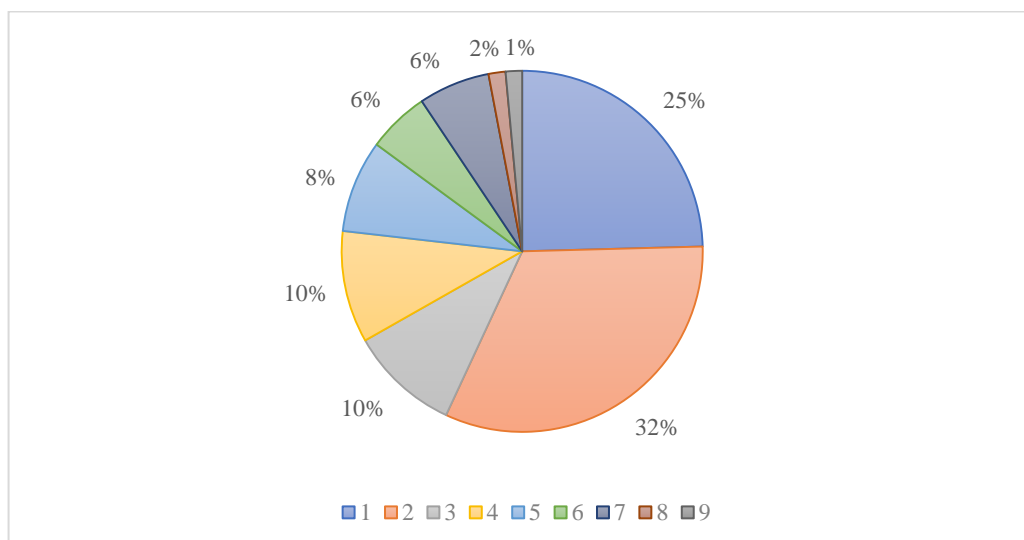


Рисунок 1.13 – Доли проданных в России ТТМ в период с 2013 по 2023 год:
 1 – экскаваторы-погрузчики; 2 – гусеничные экскаваторы; 3 – погрузчики с бортовым поворотом; 4 – колесные погрузчики; 5 – гусеничные тракторы; 6 – колесные экскаваторы; 7 – самоходные грейдеры; 8 – сочлененные самосвалы; 9 – самосвалы с жесткой рамой

Учитывая растущую оснащенность парков ТТМ экскаваторами-погрузчиками, за ними сохранится ключевая роль в НАСФ.

Для исследования выбран полноприводный экскаватор-погрузчик с равновеликими колесами (4×4) как наиболее репрезентативный образец для изучения проходимости на затопленных территориях.

1.6 Анализ негативных факторов природно-климатического характера, вызываемых опасными гидрологическими явлениями

Значение водной преграды в контексте ее преодоления определяется характеристиками самой преграды и окружающего ландшафта, а также сезонными и суточными колебаниями, погодными условиями, особенностями последствий половодий, паводков и наводнений, а также спецификой применяемых сил и мероприятий, направленных на преодоление водных барьеров [129].

Характер водной преграды определяется ее шириной, скоростью течения, изменением глубины затопления, свойствами донной опорной поверхности, наличием гидростатических сооружений (дамб, шлюзов, плотин), наличием волнения, температурой воды, наличием обломков зданий, деревьев и др., площадью и продолжительностью затопления, временем начала (сезоном) затопления [1, 2, 127].

К метеорологическим условиям водной преграды относятся наличие дождя, снега, града, тумана и т.п.

Все перечисленные факторы оказывают неблагоприятное воздействие на ТТМ, применяемые при аварийно-спасательных и других работах в зоне затопления. Важным фактором воздействия на эффективность работы ТТМ в указанных условиях является подготовленность экипажа. Структурная схема факторов природно-климатического характера, влияющих на применение ТТМ в зонах затопления, изображена на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Схема природно-климатических факторов, оказывающих влияние на применение ТТМ в зоне затопления

Скорость течения имеет большое значение для некоторых видов наводнений (при прорыве плотин и при катастрофических паводках на горных и предгорных реках) [111]. При производстве измерений скорости течения наблюдается турбулентный режим движения воды, которое характеризуется перемешиванием масс жидкости, вызывающим пульсацию скоростей, по величине и

направлению [7 128]. В условиях наводнения выделяются четыре зоны катастрофического затопления, классифицированные по скорости течения водных масс. Первая зона располагается непосредственно у гидросооружения или источника природного явления и охватывает участок протяженностью 6 – 12 км. В этой зоне наблюдается волна высотой до нескольких метров, сопровождающаяся бурным течением со скоростью 30 км/ч и выше, при этом время прохождения волны составляет около 30 минут. Вторая зона характеризуется быстрым течением (15 – 20 км/ч), имеет протяженность 15 – 25 км и время прохождения волны составляет 50 – 60 минут. Третья зона, с умеренным течением (10 – 15 км/ч), простирается на 30 – 50 км, а время прохождения волны составляет от 2 до 3 часов. Четвертая зона, в которой течения слабые (6 – 10 км/ч), может иметь протяженность от 36 до 70 км, в зависимости от особенностей рельефа местности, начиная от гидросооружений или мест возникновения природного явления.

Проведенный анализ гидродинамических параметров наводнений позволяет установить критические сочетания глубины и скорости потока, представляющие непосредственную опасность для человека. При скорости водного потока менее 0,7 м/с пороговым значением глубины, при котором возникает угроза жизни, составляет 1,5 м. Увеличение скорости потока до 0,7 м/с и более снижает критическую глубину до 1,0 м.

Наиболее опасными являются условия формирования волны прорыва, где сочетание глубины потока свыше 1,5 м и скорости течения более 1,5 м/с создает катастрофическую гидродинамическую нагрузку, приводящую к массовой гибели людей и животных [40, 129].

При форсировании водных преград на корпус ТТМ воздействует комплекс гидростатических и гидродинамических сил, возникающих при движении по донному основанию. Указанные силы распределяются по всей смоченной поверхности машины [129] и создают значительные выталкивающие и опрокидывающие силы и моменты. Гидродинамическое давление, воздействующее на днище и боковые поверхности транспортного средства, вызывает перераспределение нормальных реакций опор по осям и бортам, что

может привести к частичной или полной потере управляемости, нарушению курсовой устойчивости и создает риски опрокидывания машины.

Под сопротивлением движению ТТМ принято понимать сопротивление корпуса машины и ее ходовой части. Оно во многом зависит от формы и размеров подводной части корпуса машины. Кроме того, при ускоренном движении через водную преграду сила тяги движителя расходуется не только на преодоление сопротивления движению, но и на ускорение самой ТТМ и некоторой массе воды, которая ее окружает [8, 9].

Волнение водной преграды негативно сказывается на возможности ее преодоления ТТМ, поскольку вызывает дополнительную нагрузку на корпус из-за ударов волн, увеличивая сопротивление воды движению машины, заливая ее носовую и кормовую части. Сильные бортовые волны могут привести к потере устойчивости и к опрокидыванию машины [8, 9, 40, 122, 130].

Движение колеса в воде вызывает сложные гидродинамические эффекты. Турбулентная диссипация энергии формирует водяной клин перед шиной, увеличивая сопротивление качению. Одновременно охлаждение шины снижает ее эластичность, дополнительно повышая энергопотери. Эти факторы существенно влияют на сопротивление движению машин при движении через водную преграду.

Температура воды оказывает значительное влияние на давление воздуха в шине. При работе машины при температуре $+10...+25^{\circ}\text{C}$ давление шины находится в норме (около 2 атм.), при резком снижении температуры (в условиях затопления температура воды может варьироваться от 0 до $+10^{\circ}\text{C}$) давление в шине может упасть до 1,2 – 1,3 атм. Поскольку для эффективного движения применяются шины сверхнизкого давления, плечевая зона шины изнашивается быстрее, чем середина протектора. Такая шина может лопнуть или разбортироваться на повороте или при заезде на препятствие. При регулярной эксплуатации шины с давлением на 20% ниже нормы наблюдается снижение срока ее службы в среднем на 30% [131, 132].

Продолжительная работы в условиях затопления интенсифицирует износ узлов, агрегатов и элементов кузова машины, а также скорость развития коррозионных процессов.

Преодоление водной преграды ТТМ представляет собой процесс, состоящий из следующих этапов [10, 11]: съезд с берегового склона в воду, движение по дну водной преграды и выход на берег.

Этапы входа и выхода из воды характеризуются одновременным взаимодействием ходовой системы с тремя различными средами: береговым грунтом, донным основанием и водной средой. Экспериментальные исследования подтверждают, что коэффициент сцепления при этом определяется комплексом факторов [10, 11]:

- характеристиками грунта: тип покрытия, гранулометрический состав, нарушение структуры, травянистость, относительная влажность, степень уплотнения поверхностного слоя, сопротивление сдвигу и срезу;

- параметрами колес: величина среднего и фактического давления на грунт, размерность шин, внутреннее давление воздуха, конструкция грунтозацепов.

Влияние влажности на сцепные свойства носит разнонаправленный характер: для глинистых и суглинистых грунтов увеличение влажности свыше 10 – 12% ухудшает сцепление, тогда как для песчаных грунтов наблюдается обратная зависимость [10, 11].

Буксование в условиях водной преграды вызывает кавитационную эрозию грунта с образованием глубокой колеи, что приводит к резкому возрастанию лобового сопротивления. Процесс сопровождается срезом грунтового слоя и его гидродинамическим размывом, что вызывает прогрессирующее ухудшение сцепных качеств и полную потерю проходимости [133, 134].

Снижение давления в шинах, применяемое для повышения опорной проходимости колесных машин, приводит к значительному прогибу центральной части протектора вследствие недостаточного внутреннего подпора. Данное явление вызывает неравномерное распределение нагрузки в пятне контакта с донной опорной поверхностью, что проявляется в уменьшении эффективной площади контакта грунтозацепов и снижении коэффициента сцепления [135].

Теоретическое снижение среднего удельного давления машины на грунтовое основание может быть обеспечено посредством уменьшения собственной массы техники, применением шин уширенного профиля, дополнительных колесных опор и увеличенного диаметра колес. Специализированные рисунки протектора улучшают сцепные свойства в различных грунтовых условиях [10, 11], снижая удельное давление на грунт и увеличивая площадь контакта.

Проведенный анализ факторов взаимодействия машины с водно-грунтовой средой позволил систематизировать и сформулировать перечень допущений и ограничений при математическом моделировании движения ТТМ вброд:

— исследуется движение полноприводного экскаватора-погрузчика с блокируемыми межосевыми и межколесными дифференциалами, с равновеликими колесами;

— движение осуществляется по затопленному участку слабозаиленного асфальтобетонного покрытия без колееобразования, процессы входа и выхода из воды не рассматриваются;

— исследуемые скорости перемещения машины – максимально возможные из условий ее движения на 1-й и 2-й передачах, что ограничено по результатам предварительной оценки интенсивности волнообразования;

— глубины затопления машины варьируются в диапазоне 0,6...1,8 м, что ограничено максимальным значением глубины оборудуемых глубоководных бродов;

— скорости течения водной преграды рассматриваются в диапазоне 0,5...3 м/с, что ограничено ведомственными нормативными требованиями МЧС по мерам безопасности;

— турбулентные процессы взаимодействия движущегося колеса с водой не учитываются в связи с малой угловой скоростью их вращения;

— влияние температуры воды на изменение физико-механических свойств пневматической шины не учитывается ввиду незначительного влияния на тягово-сцепные свойства машины.

1.7 Обзор и анализ научных исследований по проблеме взаимодействия транспортно-технологических машин с водной и донно-опорной средой и устойчивостью их движения в зонах наводнений

Для того чтобы обосновать требования по уровням бродоходимости ТТМ, необходимо определить риск неустойчивости, которому подвергаются транспортные средства в зонах, подверженных наводнениям [26, 27].

В работе [28] представлены результаты экспериментальных исследований на масштабных моделях автомобилей Ford Focus, Volvo XC90 и Ford Transit, направленных на определение критических параметров водного потока (глубины и скорости), вызывающих начало движения неподвижного частично затопленного транспортного средства. Исследование выполнено методами физического моделирования с соблюдением критериев гидродинамического подобия.

В исследовании [29] выполнены эксперименты на трех типах масштабных физических моделей автомобилей Mini Cooper, Mitsubishi Pajero и BMW X5, причем для каждого типа автомобиля испытано по две модели в масштабах 1:43 и 1:18. На основе проведенных экспериментов получена расчетная зависимость для прогнозирования начала движения припаркованных затопленных транспортных средств, учитывающая массогабаритные параметры автомобиля, силы плавучести и гидродинамического сопротивления.

В рамках исследований [30, 31] применены методы вычислительной гидродинамики для анализа взаимного влияния транспортных потоков и паводковых вод в городских пойменных территориях. Проведенное моделирование позволило оценить воздействие движущихся транспортных средств на распространение паводковых вод и одновременно проанализировать влияние водных потоков на устойчивость транспортных средств.

В работе [32] разработан механизм оценки устойчивости частично погруженных автомобилей (Honda Accord и Audi Q7), объединяющий аналитические методы механики сплошных сред и экспериментальные данные, полученные при испытаниях масштабных моделей. Предложенная методика

позволяет определять критические параметры устойчивости транспортных средств в условиях затопления с учетом их массогабаритных характеристик и гидродинамических свойств.

В исследованиях [33, 34] выполнено моделирование перемещения неподвижных транспортных средств водным потоком в условиях наводнения с применением трехмерных вычислительных моделей для оценки гидродинамических сил сопротивления и выталкивающей силы. На основе полученных данных предложены критерии безопасности для легкового транспорта и автомобилей экстренных служб.

В работе [35] разработан и теоретически обоснован коэффициент устойчивости автомобилей в условиях затопления, учитывающий влияние сил трения и плавучести. Экспериментальные исследования проведены на 12 масштабных моделях автомобилей в различных геометрических масштабах. Результаты исследований позволили определить область стабильной неподвижности для припаркованных автомобилей в условиях паводковых вод.

В работе [36] выведена аналитическая зависимость между глубиной водной среды и критической скоростью движения частично погруженных транспортных средств, учитывающая взаимную ориентацию вектора потока и продольной оси автомобиля. Разработанная модель интегрирует параметры гидродинамического сопротивления, силы плавучести и сцепных свойств движителя с подводной поверхностью, что позволяет прогнозировать пороговые значения устойчивости транспортных средств в условиях затопления.

Проведенный анализ научной литературы демонстрирует, что существующие исследования влияния затоплений на транспортную инфраструктуру носят преимущественно локальный характер. Большинство работ сосредоточено на изучении последствий конкретных паводковых событий в определенных географических регионах, что ограничивает возможность формулирования универсальных закономерностей.

Основное внимание исследователей направлено на анализ устойчивости неподвижных легковых автомобилей при различных параметрах затопления. Для

этого применяются современные методы компьютерного моделирования и эксперименты на масштабных моделях, позволяющие детально изучать гидродинамические силы, действующие на неподвижные машины.

Существенным пробелом в современных исследованиях является отсутствие работ, посвященных изучению воздействия гидродинамических нагрузок на движущиеся ТТМ. Недостаточно изучены вопросы устойчивости и управляемости таких машин при движении в условиях частичного и глубоководного погружения, что имеет критическое значение для обеспечения эффективности аварийно-спасательных операций в зонах затопления.

В исследованиях В. И. Ладанова и А. С. Емельянчика [7] предложены методики расчета зависимости сопротивления воды от скорости движения плавающих образцов автомобильной техники, основанные на модельных испытаниях и приближенных формулах. Эти методики обеспечивают оперативное и точное определение сопротивления воды при заданной скорости движения машины, а также решают задачу теоретического расчета явлений, связанных с обтеканием машины потоками воды, что способствует повышению эффективности и качества выполнения задач различными образцами военной техники.

В работах С. С. Зиновьева, В. Ф. Васильченкова, А. С. Бондарева и Н. Н. Болгова [8, 9] представлены результаты оценки влияния скорости движения плавающей машины (далее – ПМ) на гидродинамическое сопротивление и воздействие волнения водной поверхности различной балльности на корпус плавающих образцов автомобильной техники при преодолении водных преград. Анализ данных показывает, что для уменьшения силы удара волны о корпус ПМ целесообразно входить в воду под прямым углом к фронту распространения волны, что минимизирует площадь контакта.

В исследованиях [10, 11] А. В. Шаховцева, О. А. Серякова, К. О. Серякова, М. А. Радченко, Т. А. Ивахненко и А. Сами представлены результаты комплексного исследования влияния физико-механических характеристик грунта на показатели проходимости бронетранспортера при форсировании мелководных акваторий. Экспериментально-теоретический анализ продемонстрировал, что

ключевыми направлениями повышения проходимости плавающих машин являются: минимизация удельного сопротивления качению колесного движителя, оптимизация сцепных свойств ходовой системы с грунтовым основанием и применение специализированных устройств генерации тяги, функционально независимых от реологических характеристик контактной среды. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии гранулометрического состава и влажности донных отложений на реализацию тягового потенциала машины.

Исследования В. Н. Зузова, И. Ван и В. Ичжоу [12 – 15] посвящены оптимизации прочности и конструкции корпусов скоростных амфибийных машин. Методами компьютерного моделирования изучены экстремальные гидродинамические нагрузки при движении по воде, выявлены критические режимы нагружения и определены оптимальные параметры конструкций для обеспечения их целостности в водной среде. На этой основе разрабатываются и верифицируются рациональные конечно-элементные модели (далее – КЭМ), обеспечивающие точный расчет прочности и динамики при экспериментальном подтверждении. Ключевым аспектом является топологическая оптимизация силового каркаса кузова с применением методов многокритериального анализа для достижения оптимального баланса минимальной массы, прочности и жесткости.

Исследования В. С. Макарова [16 – 21] сосредоточены на физике взаимодействия роторно-винтового и колесного движителей (далее – РВД) с различными средами, включая гидродинамический анализ работы полностью погруженных шнеков в воде и механику силового воздействия на снежный покров. Параллельно изучаются физико-механические свойства сложных сред (таких как снежно-песчаные смеси) для точного моделирования. На основе этого разрабатывается классификация типовых конструкций опорных поверхностей под разные условия и критерии оценки эффективности и проходимости машин. Цель всех работ – фундаментальное понимание и практическая оптимизация взаимодействия движителя со слабыми грунтами, снегом и водой для повышения проходимости, надежности и эффективности ТТМ.

Исследования Д. Ю. Малахова и С. В. Зайцева [20 – 24] сосредоточены на разработке, моделировании и практической реализации амфибийных шнекороторных платформ и РВД для эксплуатации в сложных условиях. Исследования охватывают фундаментальное изучение механики взаимодействия РВД со снежным покровом, снежно-ледовыми и водными поверхностями, включая моделирование динамики движения платформ по суше и воде для выявления силовых факторов и критических режимов.

В исследовании [133] Н. Л. Баулова и Р. В. Стрельцова установлено, что изменение давления в шинах аналогично влияет на проходимость как под водой, так и на суше. На подводных суглинках с текучим слоем 10 – 15 см давление почти не влияет на сцепление. Однако на плотном песке снижение давления с 3,5 до 0,5 кг/см² увеличивает сцепление на 30%. Повторное движение по одному следу снижает сцепление на 30 – 35%, что делает такой способ передвижения по донному песку неэффективным.

В исследованиях [134] Н. Л. Баулова, М. Л. Гаджиева, Р. Р. Фардзинова и Р. В. Стрельцова предложено применение системы определения глубины брода WadeSensing на автомобилях. Эта система предоставляет водителю начальные рекомендации по преодолению водных преград, определяет максимально допустимую глубину, учитывает уклон и рельеф дна, а также отображает информацию на дисплее панели приборов или сенсорном экране.

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования по оценке приспособленности многоцелевых автомобилей к преодолению глубоководных бродов были проведены в 21 НИИИ ВАТ МО [25]. Результаты показали принципиальную возможность по тягово-сцепным показателям и без потери устойчивости преодоления бродов глубиной до 1,8 м, а также возможность конструктивного обеспечения безотказной работы агрегатов, узлов и систем автомобилей при погружении в воду.

Проведенный анализ показал, что современные исследования по оценке взаимодействия наземных ТС с водно-грунтовой средой посвящены в основном вопросам сохранения неподвижного состояния ТС в условиях затопления

движущимся водным потоком, а также взаимодействию плавающих колесных машин с береговым и донным грунтом при входе и выходе из воды с использованием сухопутного и водного движителей. Экспериментальные исследования проводятся преимущественно на физических масштабных моделях. Влияние гидростатических и гидродинамических факторов водной среды на движущееся ТС исследовано крайне ограничено, а в отношении ТТМ таких исследований не было выявлено.

1.8 Обзор и анализ научных исследований в области численного моделирования процесса обтекания объекта в разных средах и в области экспериментальных исследований по определению аэро- и гидродинамических характеристик

В условиях сложности и опасности экспериментальных исследований на натуральных образцах численное моделирование движения ТТМ через водную преграду по слабдеформируемому основанию вброд является одним из способов расчетного определения гидродинамических характеристик. Опыт подобных исследований хорошо известен в областях изучения обтекаемости судов, летательных аппаратов, средств железнодорожного и автомобильного транспорта.

Применительно к задаче моделирования перехода ТТМ через водную преграду центральное значение приобретает учет многофазности среды. Многофазные потоки представляют собой систему, в которой протекают значительно более сложные физические процессы по сравнению с однофазными средами. В рамках двухфазного течения идентифицируются различные режимы взаимодействия между фазами, включая пузырьковый, снарядный, пенный, капельно-кольцевой и капельный режимы. Для численного моделирования многофазных потоков применяются Лагранжевы и Эйлеровы методы описания.

По методу Лагранжа проводится анализ движения отдельных частиц или групп частиц дисперсной фазы, что позволяет детально отслеживать их динамику. Рассматриваются отдельные частицы жидкости, представляющие собой

материальные точки, заполняющие движущийся объем [136]. В программном комплексе ANSYS Fluent для моделирования движения дискретных частиц в непрерывной фазе используются подходы в виде моделей дискретной фазы Discrete Phase Model и метода дискретных элементов Discrete Element Method [137].

В отличие от лагранжева метода, эйлеров подход базируется на анализе изменения характеристик потока, таких как скорость, давление и температура, в фиксированных точках пространства, что позволяет получить целостное представление о динамике течения [137, 138]. При моделировании многофазных потоков как взаимопроникающих континуумов вводится понятие объемной доли для каждой фазы, отражающее объемное соотношение компонентов в пределах контрольного объема. При этом уравнения сохранения массы и импульса формулируются и решаются для каждой фазы в отдельности. В рамках эйлерова описания многофазной среды все фазы трактуются как сплошные континуумы. Эйлеров подход реализуется через такие модели, как VOF (Volume of Fluid — метод отслеживания объема жидкости), Mixture (модель многокомпонентной смеси) и полная эйлерова модель, известная как модель взаимопроникающих сред [139].

Кроме того, существуют гибридные модели, которые комбинируют элементы обоих подходов. В таких моделях реализуется усреднение по пространству, что позволяет переходить от реалистичного распределения частиц к объемной доле, обеспечивая более комплексный и адаптивный подход к моделированию многофазных течений.

Работа [140] посвящена исследованию гидродинамического взаимодействия судов с использованием методов вычислительной гидродинамики. Авторы рассматривают проблему столкновения судов при маневрировании вблизи друг от друга. Основной проблемой исследования является то, что взаимодействие судов приводит к возникновению дополнительных гидродинамических сил и моментов, ухудшающих маневренность и увеличивающих риск столкновения. Для моделирования взаимодействия судов использовались программные комплексы CFD: ANSYS Fluent, NUMECA FINETM/MARINE и STAR – CCM+.

В научном исследовании [141] методами вычислительной гидродинамики проанализировано гидродинамическое взаимодействие судов при обгоне стоящего судна в условиях встречного течения. Моделирование включает анализ стационарных задач, процессов волнообразования и влияния встречного потока, что позволяет получить детальные данные о продольных и поперечных силах, а также моменте вращения, воздействующих на корпус неподвижного судна.

В работе [142] также рассматривается гидродинамическое взаимодействие между судами с использованием CFD, с акцентом на маневр обгона. Исследование выявляет потенциальные опасности, возникшие из-за значительных гидродинамических сил и моментов, и демонстрирует, что CFD-моделирование позволяет точно предсказывать эти величины, результаты которого согласуются с экспериментальными данными и теоретическими исследованиями.

В исследовании [143] с помощью численного моделирования анализируется турбулентное течение вокруг транспортного средства, расположенного близко к земле. Рассматривается упрощенная модель грузового автомобиля с полуприцепом, что обусловлено доступностью экспериментальных данных и сложной гидродинамикой. Поток вокруг ТС оказывается нестационарным, с обширной зоной разделения, выходящей за пределы длины автомобиля. Распределение коэффициента сопротивления в целом соответствует экспериментальным данным. Расчетный коэффициент сопротивления составляет 0,37, в то время как экспериментальное значение — 0,27. Коэффициент подъемной силы равен 1,19.

Научная статья [144] посвящена исследованию аэродинамических свойств автомобилей с использованием численного моделирования и экспериментальных испытаний в аэродинамической трубе. Для моделирования обтекания автомобилей различных конфигураций (седан, хэтчбек, универсал) применялся программный пакет XFlow 2012. Экспериментальное исследование проводилось на моделях автомобилей, изготовленных из пенополиуретана. Авторы получили данные о поле скоростей и лобовом сопротивлении для каждой модели, выявив хорошее согласие между результатами численного моделирования и экспериментальными данными.

В статье [145] анализируется эффективность программного комплекса ANSYS Fluent для расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления тел в дозвуковом и трансзвуковом режимах обтекания. Авторы утверждают, что ANSYS Fluent предлагает более эффективный и точный подход, позволяющий моделировать сложную гидродинамику и детализировать картину течения вокруг тела.

Исследовательская работа [146] демонстрирует эффективность программного пакета ANSYS CFX для моделирования аэродинамических характеристик трехмерных тел, сосредоточив внимание на снаряде и его аэродинамическом поведении при различных углах атаки и числах Маха. Применяемый подход вычислительной гидродинамики решает усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для турбулентного потока сжимаемого вязкого газа, используя модель турбулентности $k-\varepsilon$, которая учитывает турбулентный характер воздушного потока. Проверка численной модели, основанная на сравнении прогнозов коэффициентов сопротивления и подъемной силы для осесимметричного тела с экспериментальными данными, показала хорошее согласие: расхождения составили 5–7% для коэффициента сопротивления и 15% для коэффициента подъемной силы.

В научной статье [147] представлен новый подход к поиску оптимальных режимов полета тела с помощью CFD-моделирования и полиномиальной аппроксимации результирующих аэродинамических сил. Авторы стремятся продемонстрировать эффективность этого метода в определении достижимых и стабильных условий полета для различных режимов полета.

Статья [148] посвящена моделированию обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона, представленного в виде прямоугольного параллелепипеда. Целью исследования является определение аэродинамических сил, действующих на подвижной состав. Использовался программный комплекс ANSYS CFX 2023 с моделями турбулентности $k-\varepsilon$ и $k-\omega$. Получены значения коэффициента аэродинамического сопротивления (C_x) для различных параметров

сетки и моделей турбулентности. Обе модели показали схожие результаты, с разницей в C_x не более 0,2%

В работе [149] рассматривается возрастающая роль вычислительной гидродинамики в аэродинамике, особенно в авиационной и автомобильной отраслях. Обсуждается эволюция методов CFD-моделирования и их применение вместе с физическими экспериментами в аэродинамических трубах для сокращения циклов разработки и затрат. Приведены численные методы, используемые в аэродинамических расчетах, включая метод конечных разностей, метод конечных объемов и метод конечных элементов (далее – МКЭ).

В статье [170] подчеркивается значимость вычислительной гидродинамики для совершенствования экспериментальной методологии в аэродинамических испытаниях. Предварительные расчеты предоставляют критические выводы, направляющие экспериментальные исследования, что позволяет избежать ошибок и улучшить точность данных. Освещаются факторы, такие как стенки аэродинамической трубы, опорные конструкции модели и уровень турбулентности. Каждый тип аэродинамической трубы (сверхзвуковая, дозвуковая, трансзвуковая) требует специфических настроек.

В процессе определения гидродинамических параметров, особенно в условиях сложной или нестандартной геометрии обтекания, высоких скоростей потока или наличия многофазных сред, исключительно численного моделирования зачастую оказывается недостаточно. Несмотря на значительный прогресс в области вычислительной гидродинамики, такие методы обладают рядом ограничений: они чувствительны к качеству расчетной сетки, выбору турбулентных моделей, граничных условий и допущений, используемых в расчетах. Это может приводить к искажению реальной картины течения и существенным отклонениям от натуральных значений параметров.

Аэродинамический (гидродинамический) эксперимент позволяет получить достоверные данные, которые учитывают реальные физические эффекты, включая нелинейные взаимодействия потоков, вихреобразование, кавитацию и влияние поверхностных неровностей. Эксперимент служит не только источником

достоверной информации, но и основой для верификации и калибровки численных моделей. Высокая точность и надёжность оценки гидродинамических характеристик, особенно при проектировании и оптимизации сложных технических систем, достигается только за счёт комбинации численного моделирования и аэродинамического/гидродинамического эксперимента.

Исследования [151, 152] посвящены методам, применяемым в аэродинамических экспериментах для анализа взаимодействия воздушных потоков с объектами. В работе рассматриваются ограничения теоретических методов, которые часто не обеспечивают точности из-за несовершенства математических моделей. В связи с этим экспериментальные методы становятся ключевыми для надежного определения аэродинамических характеристик. Обсуждаются основные подходы, такие как движущийся объект в неподвижном воздухе и неподвижный объект в движущемся воздухе, а также классификация аэродинамических труб и принцип их устройства.

В исследовании [153] представлены результаты экспериментальных испытаний аэродинамических свойств легкового автомобиля, проведенных в аэродинамической трубе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (далее – НГТУ им. Р.Е. Алексеева) с использованием масштабных макетов. В результате исследования получены экспериментальные данные по аэродинамическим характеристикам различных моделей, что позволило выявить автомобили с наилучшими аэродинамическими показателями.

В статье [154] рассматриваются разработка и изготовление масштабной модели самолета МС-21 для аэродинамических испытаний в трубах Т-104 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского (далее – ЦАГИ). Длина модели составляет 4,5 метра, размах крыльев – 4 метра, предназначена для тестирования в режимах взлета и посадки при числах Маха от 0,15 до 0,25. Основные задачи испытаний включают определение аэродинамических сил и моментов, действующих на самолет и его управляющие поверхности; анализ характеристик на критических и

сверхкритических углах атаки, а также оценку аэродинамических сил и моментов на шасси.

Научная статья [155] является обзором исследований в области аэродинамики плохообтекаемых тел, таких как грузовые автомобили. Авторы анализируют различные подходы к снижению аэродинамического сопротивления, включая скругление передних кромок кузова, ступенчатую форму передней части, установку направляющих планок и аэродинамических устройств (обтекателей, козырьков, спойлеров). Также рассматривается влияние аэродинамики на динамические характеристики ТС, самозабрызгиваемость, акустический комфорт, систему питания двигателя воздухом, вентиляцию и отопление, а также температурный режим тормозных механизмов. Исследования, проведенные на КАМАЗе, показали, что применение аэродинамических устройств позволяет снизить расход топлива на 2,5% и улучшить аэродинамические характеристики.

В статье [156] рассматривается аэродинамическое сопротивление плохо обтекаемых кузовов, с акцентом на компоненты аэродинамического сопротивления и их влияние на эксплуатационные характеристики автомобилей. Авторы стремятся представить полное понимание этих компонентов и их воздействия на расход топлива и общую эффективность. Подчеркивается значимость аэродинамического сопротивления для современных автомобилей, несмотря на его снижение. Подробно анализируются компоненты аэродинамического сопротивления, включая сопротивление формы, поверхностное трение, внутренние потоки, профильное, индуктивное и интерференционное сопротивления.

Аэродинамические трубы являются незаменимым инструментом для исследования взаимодействия воздушного потока с твердыми телами, в частности, автомобилями [157]. Они позволяют получить полную аэродинамическую характеристику проектируемого автомобиля, включая коэффициенты сил и моментов, что невозможно сделать при натурных испытаниях.

В статье [158] рассматривается определение ветровой нагрузки на комплекс из двух зданий с использованием аэродинамической трубы. Цель исследования заключается в оценке воздействия ветра, особенно на высотные здания, и влияния

соседних конструкций. Моделирование проводилось на модели, состоящей из 23-этажного высотного и 9-этажного зданий. В процессе эксперимента были оценены аэродинамические коэффициенты, включая сопротивление, боковые силы и моменты, возникающие при взаимодействии ветра с конструкциями.

В статье [159] исследуются аэродинамические характеристики электропоездов и их влияние на энергопотребление. Авторы анализируют, как форма ТС влияет на сопротивление с целью повышения эффективности городского движения. К факторам, влияющим на сопротивление, относятся конструкция ТС, профиль пути, скорость, направление ветра и трение в местах контакта.

В исследовании [160] рассматривается применение аэродинамических труб для анализа аэродинамических свойств автомобилей и оптимизации форм кузова на этапе проектирования. Данные исследования направлены на улучшение управляемости, увеличение максимальной скорости, мощности, динамики и устойчивости, а также на повышение комфорта и снижение воздействия на окружающую среду и расхода топлива.

Анализ рассмотренных научно-методических материалов позволил сформировать подход к использованию численного моделирования для определения гидродинамических характеристик ТТМ и к оценке его достоверности методом испытания на физической модели в аэродинамической трубе.

Выводы по главе 1

1. Исследование бродоходимости ТТМ является актуальным ввиду роста частоты, интенсивности и тяжести последствий от ОГЯ, в условиях которых такие машины становятся основными средствами обеспечения эвакуации, доставки грузов и проведения аварийно-спасательных работ. Современные ТТМ не в полной мере адаптированы к применению в экстремальных условиях затопления, что требует переосмысления подходов к их конструкции и эксплуатации.

2. Изучение отечественного и зарубежного опыта показало, что эффективность действий аварийно-спасательных служб в условиях затоплений

напрямую зависит от их технической оснащенности и готовности специализированных ТТМ к применению. Это делает необходимым переоснащение парка техники, задействованной в ликвидации последствий затоплений, в том числе с учетом повышения требований к ее бродоходимости.

3. В Российской Федерации при проведении аварийно-спасательных работ в условиях затопления широкое применение находят колесные ТТМ. Среди них наибольшее распространение получили самосвалы, погрузчики, бульдозеры и экскаваторы, которые обеспечивают выполнение основных задач по ликвидации негативных последствий наводнений. Однако, несмотря на универсальность и высокую проходимость на суше, эти машины не всегда обеспечивают необходимую эффективность их применения при работе в зонах затопления. Это определяет необходимость комплексного анализа их бродоходимости и разработки решений по ее повышению.

4. Выбор для исследования и моделирования взаимодействия с водно-грунтовой средой в качестве машины-прототипа экскаватора-погрузчика обоснован его распространенностью, конструктивными особенностями, техническими характеристиками и возможностью широкой адаптации для решения задач в зоне затопления. Это позволяет использовать полученные результаты для разработки рекомендаций применительно к широкой номенклатуре ТТМ.

5. Идентифицированы ключевые факторы, существенно влияющие на эффективность работы ТТМ в зоне затопления, включающие глубину, скорость течения, состояние донной опорной поверхности, конструктивные особенности машины, ее массово-габаритные параметры, скоростные и тягово-сцепные свойства. Эти факторы необходимо учитывать при исследовании бродоходимости ТТМ.

6. Обзор показал, что несмотря на наличие ряда прикладных исследований, проблема подвижности ТТМ в условиях затопления недостаточно проработана. Особенно остро стоит вопрос определения гидродинамических и гидростатических параметров колесной машины при моделировании ее взаимодействия с водной средой и донной опорной поверхностью.

7. Установлено, что численное моделирование процессов обтекания для расчетного определения указанных параметров получило широкое распространение, однако достоверность его результатов ограничена применяемыми упрощениями. Комбинированный подход с использованием экспериментальных аэродинамических и гидродинамических исследований является необходимым для получения объективных характеристик.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ САМОХОДНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ЧЕРЕЗ ВОДНУЮ ПРЕГРАДУ ПО СЛАБОДЕФОРМИРУЕМОМУ ОСНОВАНИЮ

2.1 Постановка задачи и разработка расчетной схемы

Математическая модель разработана на примере одного из наиболее эффективных и многофункциональных представителей ТТМ, применяемых для проведения аварийно-спасательных и восстановительных работ в зонах затопления — полноприводного экскаватора-погрузчика типа 4x4 с блокируемыми межосевым и межколесным дифференциалами, оснащенного равновеликими колесами.

При разработке модели приняты следующие основные допущения [161]:

— обеспечивается полная герметичность критически важных узлов и агрегатов машины (кабина, силовой агрегат, трансмиссионные системы, системы воздухоподдачи и топливоподдачи), что исключает проникновение воды и абразивных частиц. Данное условие является фундаментальным для сохранения функциональности машины при форсировании водных преград;

— машина перемещается через водную преграду вброд по слабodeформируемому донному основанию прямолинейно и с постоянной скоростью;

— параметры взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью соответствуют твердому слабо заиленному покрытию;

— водный поток рассматривается как неподвижным (стоячим), так и подверженным течению. При этом учитывается воздействие на машину гидростатических и гидродинамических сил.

Воздействие водной среды на движущуюся в ней машину сводится к непрерывно распределенным по поверхностям сил от нормального давления и касательных напряжений, обусловленных вязкостью среды. Все эти силы

приведены к одному главному вектору гидродинамических сил \vec{F} и главному вектору момента этих сил \vec{M} относительно точки приведения.

Для анализа этих воздействий используются проекции сил и моментов на заданные координатные оси. Позиционирование машины в пространстве привязано к земной и скоростной декартовым правым системам координат. В скоростной системе координат ($Ox_a Y_a Z_a$) начальная точка находится в центре тяжести (далее – ЦТ) движущегося объекта, ось Ox_a направлена по скорости ЦТ движущегося объекта, ось OZ_a находится в продольной плоскости симметрии и направлена снизу-вверх, ось OY_a образует правую систему координат.

Проекции вектора \vec{F} на оси скоростной системы координат: $(P_{\text{лоб}}) X_a$ – сила лобового сопротивления, Н; $(P_{\text{бок}}) Y_a$ – сила бокового давления течения воды, Н; $(P_{\text{в}}) Z_a$ – подъемная (выталкивающая) сила, Н.

В земной системе координат ($O_0 X_0 Y_0 Z_0$) направления осей совпадают с направлением скоростной системы координат, а начало координат зафиксировано относительно Земли.

Расчет производится для трех случаев. В первом случае при прямолинейном движении ТТМ с постоянной скоростью через стоячую водную преграду. Во втором – ТТМ неподвижна, водная преграда обтекает ТТМ сбоку с постоянной скоростью. В третьем случае – ТТМ движется прямолинейно с постоянной скоростью при ее боковом обтекании водной преградой с постоянной скоростью течения.

Разработанная в соответствии с принятыми допущениями пространственная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд представлена на рисунке 2.1.

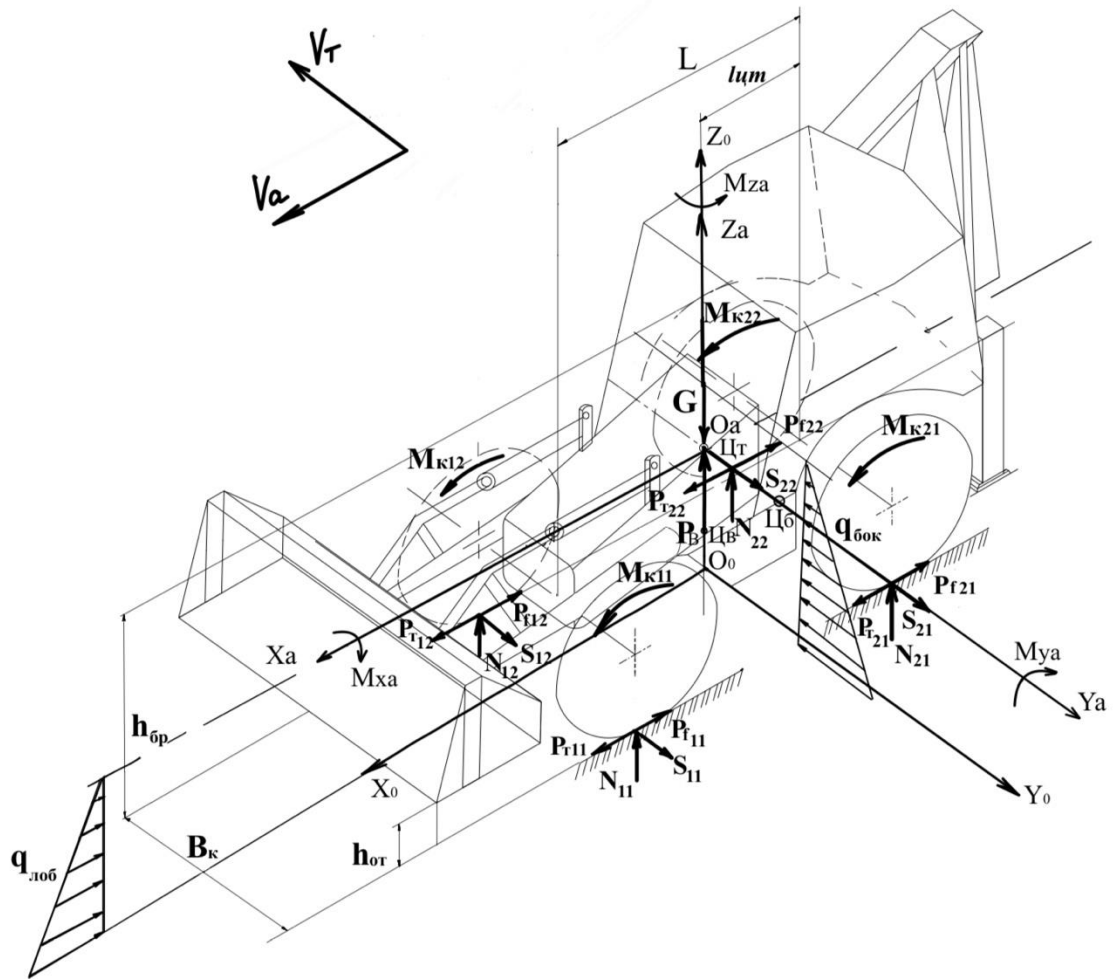


Рисунок 2.1 – Пространственная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд по слабдеформируемому основанию

В расчетной схеме рисунка 2.1 приняты следующие обозначения: $\bar{Ц}_б$ – геометрический центр продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля; $\bar{Ц}_m, \bar{Ц}_с$ – центры тяжести и водоизмещения соответственно; $h_{бр}$ – глубина водной преграды (брда), м; L – база автомобиля, м; $l_{цт}$ – расстояние от вертикальной плоскости задней оси автомобиля до ее центра тяжести и центра водоизмещения, м; $h_{от}$ – высота транспортного положения отвала, м; B_k – ширина колеи экскаватора-погрузчика, м; q_c – распределенная сила лобового сопротивления, Н/м; P_m – сила тяги, Н; N – нормальная реакция на осях, Н; M_k – крутящий момент, подводимый к колесу, Н·м; P_f – сила сопротивления качению колеса, Н; P_e – выталкивающая сила воды, Н; $q_{лоб}, q_{бок}$ – лобовая и боковая распределенные силы гидродинамического давления, Н/м. Проекция вектора \vec{M} на

оси скоростной системы координат: M_{xa} – момент крена, Н·м; M_{ya} – момент тангажа, Н·м, M_{za} – момент рысканья, Н·м.

Для упрощения вычислений пространственная расчетная схема подвергнута декомпозиции до уровня 3-х плоскостных расчетных схем (рисунки 2.2, 2.3 и 2.4). Сила бокового давления водного потока на борт машины на рисунке 2.2 действует от «нас».

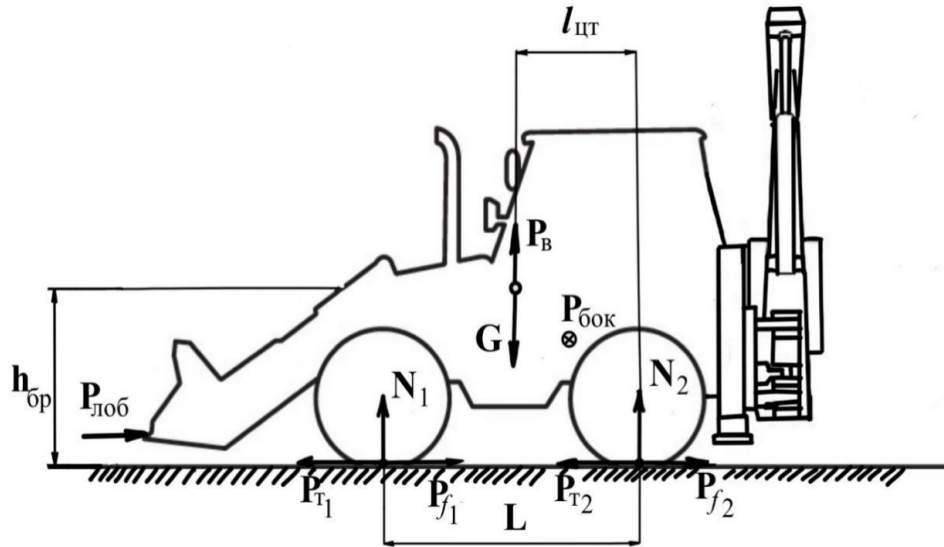


Рисунок 2.2 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд [161]

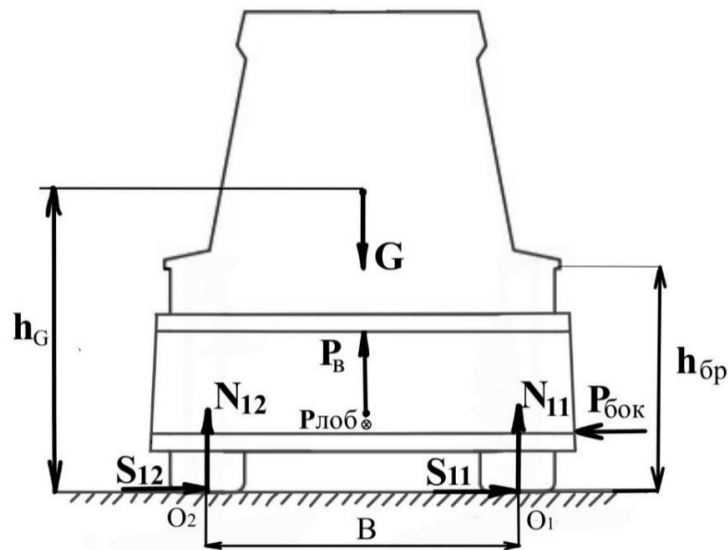


Рисунок 2.3 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд по слабдеформируемому основанию (вид спереди) [161]

Сила лобового давления водного потока на борт машины на рисунке 2.3 действует от «нас».

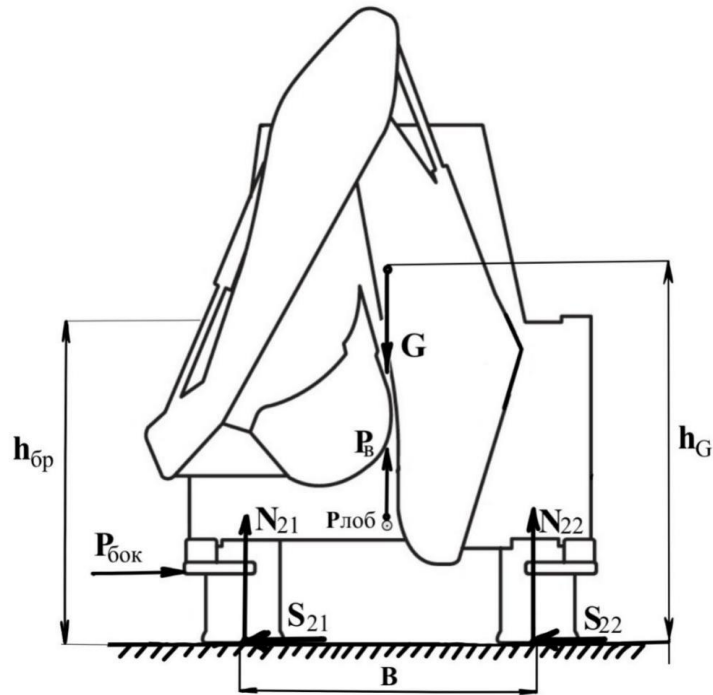


Рисунок 2.4 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд по слабдеформируемому основанию (вид сзади)

Сила лобового давления водного потока на борт машины на рисунке 2.4 действует на «нас».

Распределенная сила поперечного (далее – лобового) и продольного (далее – бокового) гидродинамических сопротивлений $q_{\text{лоб}}$, $q_{\text{бок}}$ для упрощения расчетов приводится к сосредоточенным силам лобового и бокового сопротивлений $P_{\text{лоб}}$, $P_{\text{бок}}$ [161]:

$$P_{\text{лоб}} = q_{\text{лоб}}^{\text{max}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}, \quad (2.1)$$

$$P_{\text{бок}} = q_{\text{бок}}^{\text{max}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}, \quad (2.2)$$

которые приложены на расстоянии $1/3$ глубины затопления от донной опорной поверхности, где $q = q_{\text{max}}$.

Нормальные реакции на осях экскаватора-погрузчика с колесной формулой 4x4 при прямолинейном движении по слабдеформируемому грунту определяются из уравнений моментов относительно передней и задней осей (рисунок 2.2):

$$N_1 \cdot L + P_B \cdot l_{\text{цт}} + P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} - G \cdot l_{\text{цт}} = 0;$$

$$P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} + G \cdot (L - l_{\text{цт}}) - N_2 \cdot L - P_B \cdot (L - l_{\text{цт}}) = 0.$$

Тогда нормальные реакции:

$$N_1 = \frac{G \cdot l_{\text{цт}} - P_B \cdot l_{\text{цт}} - P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3}}{L}, \quad (2.3)$$

$$N_2 = \frac{G \cdot (L - l_{\text{цт}}) - P_B \cdot (L - l_{\text{цт}}) + P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3}}{L}, \quad (2.4)$$

где N_1, N_2 – суммарные нормальные реакции на колесах соответственно первой и второй осей, Н.

Распределение нормальных реакций по колесам передней оси машины определяется из уравнения моментов сил относительно обоих бортов (рисунки 2.3):

$$N_1 \cdot \frac{B}{2} - N_{11} \cdot B - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} = 0;$$

$$N_{12} \cdot B - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} - N_1 \cdot \frac{B}{2} = 0.$$

Нормальные реакции на колесах каждого борта:

$$N_{11} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3}}{B}, \quad (2.5)$$

$$N_{12} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3}}{B}. \quad (2.6)$$

Уравнение моментов сил относительно задней оси для обоих бортов (рисунок 2.4):

$$N_{21} \cdot B + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} - N_2 \cdot \frac{B}{2} = 0;$$

$$-N_{22} \cdot B + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бп}}}{3} + N_2 \cdot \frac{B}{2} = 0.$$

Нормальные реакции на колесах каждого борта:

$$N_{21} = \frac{N_2 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{B}, \quad (2.7)$$

$$N_{22} = \frac{P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3} + N_2 \cdot \frac{B}{2}}{B}. \quad (2.8)$$

Условие сохранения сцепных свойств движителя с донной опорной поверхностью определяется соотношением веса машины и величиной гидростатической выталкивающей силы. Согласно принципу Архимеда, суммарная выталкивающая сила, действующая на погруженную в воду поверхность машины, равна весу объема воды, вытесненного этой машиной, т.е.:

$$P_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot W_{\text{ов}}, \quad (2.9)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³;

$W_{\text{ов}}$ – объемное водоизмещение ТТМ, м³.

Превышение гидростатической силы над весом ТТМ приводит к потере сцепления с грунтом, вследствие чего возникает потеря управляемости, скольжение и риск опрокидывания. Такая ситуация диктует необходимость проведения расчетов предельных значений гидростатической силы для различных уровней затопления ТТМ водной преградой.

Сила лобового гидродинамического сопротивления определяется по формуле [25, 162, 167]:

$$P_{\text{лоб}} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_{\text{в}} \cdot F_{\text{л}} \cdot V_{\text{а}}^2, \quad (2.10)$$

где C_x – коэффициент лобового гидродинамического сопротивления;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, т/м³,

$F_{\text{л}}$ – площадь лобовой проекции погруженной в воду части машины, м²;

$V_{\text{а}}$ – скорость движения машины, м/с.

Сила давления течения водной преграды на боковую поверхность машины определяется по формуле:

$$P_{\text{бок}} = 0,5 \cdot C_y \cdot \rho_{\text{в}} \cdot F_{\text{б}} \cdot V_{\text{вп}}^2, \quad (2.11)$$

где C_y – коэффициент бокового гидродинамического сопротивления;

F_6 – площадь боковой проекции погруженной в воду части автомобиля, m^2 ;

$V_{вп}$ – скорость течения водного потока, m/c .

Учет воздействия бокового течения на движение машины требует введения проекций теоретического вектора скорости на оси, ориентированные параллельно и перпендикулярно направлению потока (рисунок 2.5). Данный подход обусловлен тем, что фактическая скорость продольного перемещения машины будет ниже теоретического значения, особенно при соизмеримости скоростных параметров потока и машины. Этот фактор приобретает критически важное значение при расчетах гидродинамического сопротивления движению, поскольку именно результирующая скорость определяет величину лобового сопротивления. Корректное определение проекций скоростей позволяет более точно смоделировать реальные условия взаимодействия транспортного средства с водным потоком и оптимизировать параметры движения через водные преграды.

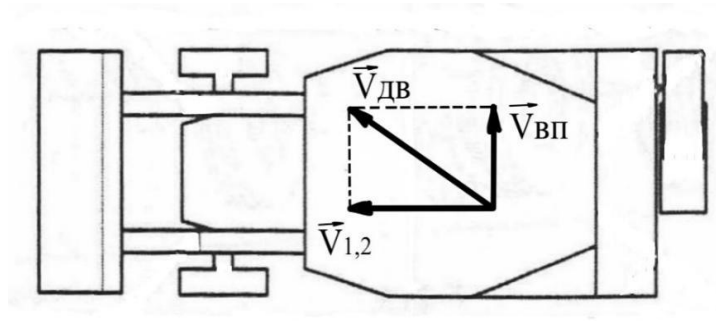


Рисунок 2.5 – Схема векторов скоростей движения экскаватора-погрузчика

Если вектор относительных скоростей \vec{V}_1 и \vec{V}_2 экскаватора-погрузчика на 1-й и 2-й передачах соответственно, $\vec{V}_{вп}$ вектор переносной скорости водного потока, то абсолютная скорость $\vec{V}_{дв}$:

$$\vec{V}_{дв} = \vec{V}_{1,2} + \vec{V}_{вп}.$$

Тогда модуль абсолютно скорости движения машины в водном потоке определяется по теореме Пифагора:

$$V_{\text{дв}} = \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{\text{вп}}^2}. \quad (2.12)$$

Определение условий устойчивости машины против опрокидывания и бокового скольжения проведено для случая движения экскаватора-погрузчика по прямолинейной траектории по плоской недеформируемой (слабдеформируемой) поверхности с учетом воздействия бокового гидродинамического давления на левый борт (рисунок 2.6).

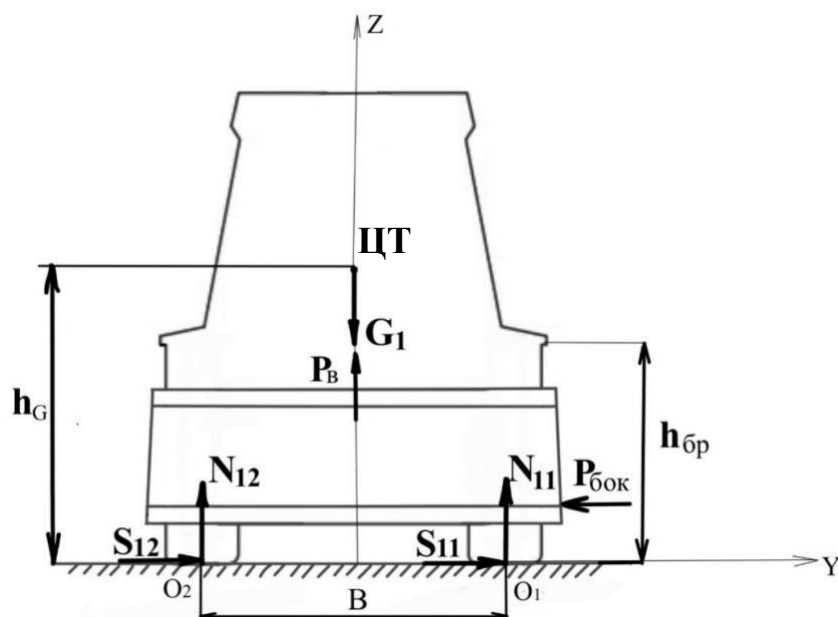


Рисунок 2.6 – Расчетная схема определения сил сопротивления боковому скольжению и опрокидыванию:

S_{11} и S_{12} – боковые реакции на колесах экскаватора-погрузчика на левом и правом бортах соответственно, Н; h_G – высота центра тяжести экскаватора-погрузчика, м;
 $P_{\text{в}}$ – выталкивающая сила воды, Н

Уравнение сил и моментов, определяющих равновесное состояние машины относительно точки O_2 :

$$\begin{cases} \frac{G \cdot B}{2} - P_{\text{бок}} \frac{h_{\text{бр}}}{3} - N_{11} \cdot B - P_{\text{в}} \cdot \frac{B}{2} = 0 \\ N_{11} + N_{12} - G + P_{\text{в}} = 0 \\ P_{\text{бок}} - S_{11} - S_{12} = 0 \end{cases}, \quad (2.13)$$

Опрокидывание экскаватора-погрузчика начнется под действием опрокидывающего момента от силы бокового гидродинамического давления:

$$M_{\text{опр}} = P_{\text{бок}} \frac{h_{\text{бр}}}{3}. \quad (2.14)$$

Реакция N_{11} левого борта становится равной нулю, т.е. восстанавливающий момент становится меньше опрокидывающего

$$M_{\text{восс}} = \frac{(G - P_{\text{в}}) \cdot B}{2} < M_{\text{опр}}. \quad (2.15)$$

При этом система уравнений (14) принимает вид:

$$\begin{cases} P_{\text{бок}} \frac{h_{\text{бр}}}{3} - \frac{G \cdot B}{2} + P_{\text{в}} \cdot \frac{B}{2} = 0 \\ N_{12} = G - P_{\text{в}} \\ S_{12} = P_{\text{бок}} \end{cases}, \quad (2.16)$$

Под воздействием силы бокового давления наступает такое состояние, когда

$$S_1 + S_2 = S \geq \varphi \cdot G = P_{\varphi\text{б}}, \quad (2.17)$$

где $P_{\varphi\text{б}}$ – сила сопротивления боковому скольжению по сцеплению, Н;

G – вес машины, 80 226 Н;

φ – коэффициент бокового сцепления колеса с опорной поверхностью, принимается равным 0,8 – 0,85 от коэффициента сцепления в продольном направлении движения колеса.

На рисунке 2.7 представлена расчетная схема определения сил сопротивления боковому скольжению.

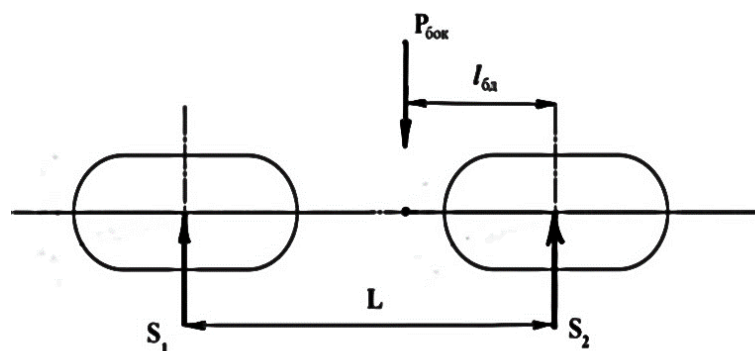


Рисунок 2.7 – Расчетная схема определения сил сопротивления боковому

Из расчетной схемы на рисунке 2.7 вытекают условия прямолинейного движения машины без сноса ее течением:

$$S_1 \cdot L - P_{\text{бок}} \cdot l_{\text{бд}} = 0,$$

$$S_1 = P_{\text{бок}} \frac{l_{\text{бд}}}{L}, \quad (2.18)$$

$$S_2 \cdot L - P_{\text{бок}} \cdot (L - l_{\text{бд}}) = 0,$$

$$S_2 = P_{\text{бок}} \frac{L - l_{\text{бд}}}{L}. \quad (2.19)$$

При этом условие поступательного движения машины – сумма всех сил сопротивления P_{Σ} , действующих на колеса в зоне их пятна контакта с опорной поверхностью, не должна превышать силу тяги на колесах по двигателю P_T и по сцеплению ведущих колеса с донным грунтом P_{φ} [4]:

$$P_{\Sigma} < P_T < P_{\varphi}. \quad (2.20)$$

Сила тяги по сцеплению:

$$P_{\varphi} = \varphi \cdot G_M, \quad (2.21)$$

где G_M – сцепной вес машины, Н.

$$P_{\Sigma} = P_f + P_{\text{лоб}}. \quad (2.22)$$

Сила сопротивления качению движителя:

$$P_f = G \cdot f, \quad (2.23)$$

где G – полная сила тяжести машины, Н

f – коэффициент сопротивления качению.

Сила тяги по двигателю:

$$P_T = \frac{M_e \cdot i_{\text{кпп}} \cdot i_{\text{рк}} \cdot i_{\text{гп}}}{r_{\text{ст}}} \eta_T, \quad (2.24)$$

где M_e – крутящий момент двигателя, Н·м;

$i_{\text{кпп}}$ – передаточное отношение коробки передач;

$i_{\text{гп}}$ – передаточное отношение главной передачи;

$i_{\text{рк}}$ – передаточное отношение коробки передач;

$r_{\text{ст}}$ – статический радиус колеса;

η_T – КПД трансмиссии.

2.2 Математическая модель прямолинейного движения транспортно-технологической машины через водную преграду вброд по слабдеформируемому основанию

Математическое описание модели движения двухосной ТТМ через водную преграду вброд по слабдеформируемому основанию, сформированное на базе приведенных выше математических описаний физических процессов ее взаимодействия с водно-грунтовой средой, представлена в формализованном виде в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Математическое описание модели прямолинейного движения колесной ТТМ через водную преграду вброд

№ п/п	Этапы расчета	Расчетные зависимости
1.	Ввод исходных данных: m , L , B , $l_{\text{цт}}$, $P_{\text{лоб}}$, $P_{\text{бок}}$, C_x , C_y , V_a , $V_{\text{вп}}$, $W_{\text{ов}}$, $h_{\text{бр}}$, ρ , g	$m, L, B, l_{\text{цт}}, C_x, C_y, V_a, V_{\text{вп}}, W_{\text{ов}}, h_{\text{бр}}, \rho, g \in \mathbb{N}$
2.	Определение веса ТТМ, G , H	$G = m \cdot g$
3.	Определение абсолютной (кажущейся) скорости, $V_{\text{абс}}$, м/с	$V_{\text{абс}} = \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{\text{вп}}^2}$
4.	Определение выталкивающей силы, P_v , H	$P_v = \rho_v \cdot g \cdot W_{\text{ов}}$ $P_v \in Z$
5.	Определение силы лобового сопротивления, $P_{\text{лоб}}$, H	$P_{\text{лоб}} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot F_l \cdot V_a^2$ $P_{\text{лоб}} \in Z$
6.	Определение силы бокового сопротивления, $P_{\text{бок}}$, H	$P_{\text{бок}} = 0,5 \cdot C_y \cdot \rho_v \cdot F_b \cdot V_{\text{вп}}^2$ $P_{\text{бок}} \in Z$

7.	Определение суммарных нормальных реакций на осях, N_1, N_2, H	$N_1 = \frac{G \cdot l_{\text{цт}} - P_{\text{в}} \cdot l_{\text{цт}} - P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{L}$ $N_2 = \frac{G \cdot (L - l_{\text{цт}}) - P_{\text{в}} \cdot (L - l_{\text{цт}}) + P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{L}$ $N_1, N_2 \in Z$
8.	Определение нормальных реакций на колесах левого и правого бортов, $N_{11}, N_{21}, N_{12}, N_{22}, H$	$N_{11} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{B}$ $N_{21} = \frac{N_2 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{B}$ $N_{12} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3}}{B}$ $N_{22} = \frac{P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бр}}}{3} + N_2 \cdot \frac{B}{2}}{B}$ $N_{11}, N_{12}, N_{21}, N_{22} \in Z$
9.	Определение силы тяги по сцеплению, P_{φ}, H	$P_{\varphi} = \varphi \cdot G$
10.	Определение сил сопротивления боковому скольжению, S_1, S_2, H	$S_1 = P_{\text{бок}} \frac{l_{\text{бд}}}{L}$ $S_2 = P_{\text{бок}} \frac{L - l_{\text{бд}}}{L}$
11.	Проверка условия по сопротивлению скольжения	$S_1 + S_2 = S \geq \varphi \cdot G = P_{\varphi}$
12.	Определение силы сопротивления качению движителя, P_f, H	$P_f = G_{\text{м}} \cdot f$

12.	Определение силы сопротивления качению движителя, P_f , Н	$P_f = G_m \cdot f$
13.	Определение суммарной силы сопротивления, P_Σ , Н	$P_\Sigma = P_f + P_{\text{лоб}}$
14.	Определение силы тяги, P_T , Н	$P_T = \frac{M_e \cdot i_{\text{кпп}} \cdot i_{\text{гп}} \cdot i_{\text{рк}}}{r_{\text{ст}}} \eta_T$
15.	Проверка выполнения условия	$P_\varphi \geq P_T \geq P_\Sigma$

Система оценивания теоретически возможных результатов, полученных на основе разработанной математической модели, представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Система оценивания результатов расчета

№ п/п	Результат оценки	Интерпретация результата
1.	Все нормальные реакции колес положительные: $N_{11} > 0, N_{21} > 0, N_{12} > 0; N_{22} > 0$	ТТМ устойчива и может преодолевать брод в данных условиях Функциональный режим
2.	Нормальная реакция на одном из колес отрицательная: $N_{11} < 0, N_{21} > 0, N_{12} > 0; N_{22} > 0;$ $N_{11} > 0, N_{21} < 0, N_{12} > 0; N_{22} > 0;$ $N_{11} > 0, N_{21} > 0, N_{12} < 0; N_{22} > 0;$ $N_{11} > 0, N_{21} > 0, N_{12} > 0; N_{22} < 0.$	ТТМ теряет сцепление с донной опорной поверхностью и начинает скольжение Допустимый режим

3.	Нормальные реакции на одной из осей отрицательные: $N_{11} < 0, N_{12} < 0; N_{21} > 0, N_{22} > 0;$ $N_{11} > 0, N_{12} > 0; N_{21} < 0, N_{22} < 0.$	ТТМ теряет сцепление с донной опорной поверхностью и начинает скольжение Критический режим
4.	Нормальные реакции на одном из бортов отрицательные: $N_{11} < 0, N_{21} < 0, N_{12} > 0; N_{22} > 0;$ $N_{11} > 0, N_{21} > 0, N_{12} < 0; N_{22} < 0.$	ТТМ теряет устойчивость и может быть опрокинута Критический режим
5.	Все нормальные реакции колес отрицательные: $N_{11} < 0, N_{21} < 0, N_{12} < 0; N_{22} < 0.$	ТТМ не имеет сцепления с донной опорной поверхностью Движение невозможно

Функциональный режим – это штатный, безопасный режим, для которого машина спроектирована. Глубина воды значительно ниже критической. Все системы работают нормально, жизненно важные полости (двигатель, трансмиссия, электроника, салон) надежно защищены от воды. Управляемость и устойчивость не нарушаются. Экипаж не подвергается риску или дискомфорту. Возможно многократное преодоление водных преград без последствий.

Допустимый режим – это режим на грани возможностей, допустимый лишь эпизодически. Глубина воды близка к критической, возможно кратковременное попадание воды в не самые критические полости (например, незначительное подтопление салона, заливание мостов без проникновения в масло) или временное ухудшение работы некоторых систем (тормоза, обзор). Риск необратимых повреждений минимален, но возможны обратимые последствия (требуется просушка, чистка). Управляемость и устойчивость могут временно ухудшиться, экипаж испытывает дискомфорт. После преодоления требуется проверка и обслуживание.

Критический режим – это аварийный, запрещенный режим, ведущий к катастрофическим последствиям. Глубина достигает или превышает критический предел. Происходит гарантированное попадание воды в жизненно важные агрегаты (гидроудар двигателя, затопление трансмиссии, замыкание электроники), вызывающее необратимые разрушения и полный отказ систем. Возникает сильное гидростатическое всплытие, приводящее к потере сцепления с грунтом, опрокидыванию или сносу. Салон затопляется, создавая прямую угрозу жизни экипажа. Преодоление в этом режиме неминуемо ведет к тяжелой аварии и выходу машины из строя.

Разработанная математическая модель может применяться для любых двухосных полноприводных транспортных средств, оснащенных блокируемым межосевым дифференциалом, а при определенных доработках и– и для колесных машин с любым количеством осей.

2.3 Методический аппарат расчетного определения исходных данных для реализации математической модели

2.3.1 Определение исходных технических характеристик исследуемой машины и задание параметров воздействующих факторов водной среды

Значения необходимых показателей технической характеристики машины принимаются и определяются по данным производителя. В качестве примера рассмотрен экскаватор-погрузчик JCB 4CX.

Центр тяжести машины определяется геометрически по габаритному чертежу исследуемой модели (рисунок 2.8).

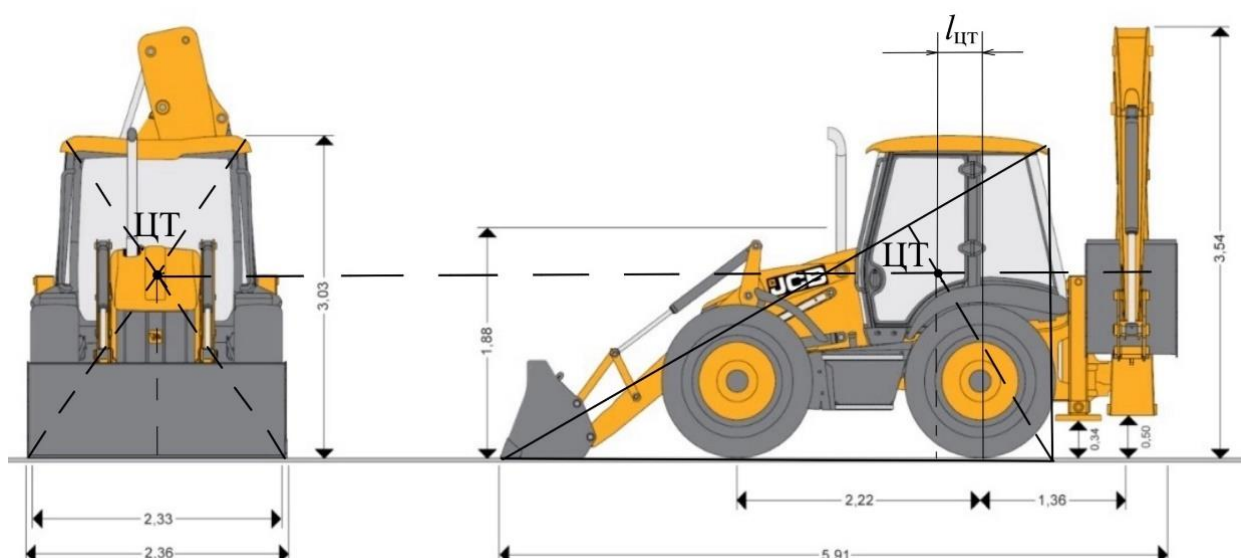


Рисунок 2.8 – Габаритные размеры экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX

Исходные технические данные экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX для расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные технические данные экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
1.	Габаритная длина, м	L_T	5,91
2.	Расстояние между осями, м	L	2,22
3.	Габаритная ширина, м	B	2,22
4.	Габаритная высота, м	H	3,03
5.	Эксплуатационная масса, кг	m	8660
6.	Крутящий момент двигателя, Н·м	M_e	425
7.	Передаточные числа коробки передач	$i_{кп}$	для 1-й передачи: 7,97 для 2-й передачи: 4,29
8.	Передаточное число главной передачи	$i_{гп}$	4,625
9.	Статический радиус колеса, м	$r_{ст}$	0,645
10.	КПД трансмиссии	η_T	0,85

11.	Продольная координата центра тяжести относительно задней оси, м	$l_{цт}$	0,43
12.	Скорость движения, м/с	V_a	для 1-й передачи: 1,4 м/с для 2-й передачи: 2,6 м/с
13.	Высота подъема отвала в транспортном положении, м	$h_{от}$	0,3

Ранее выполненными исследованиями бродоходимости многоцелевых автомобилей определена принципиальная возможность конструктивного обеспечения работоспособности узлов, агрегатов и систем самоходных машин при погружении их в воду на глубину до 1,5 ... 1,8 м и принципиальная возможность движения по донному грунту в подобных условиях [25, 41]. По аналогии для настоящего исследования приняты 5 значений глубины водной преграды $h_{бр}$ с минимальным значением 0,6 м, которое соответствует глубине брода, установленной заводом-производителем, и максимальным значением глубины водной преграды 1,8 м с шагом варьирования 0,3 м. Исследуемые параметры водной преграды представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Исследуемые параметры водной преграды

№ п/п	Параметр	Обозначение	Диапазон значений
1.	Глубина водной преграды, м	$h_{бр}$	0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8
2.	Скорость течения водного потока, м/с	$V_{вт}$	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5
3.	Плотность воды, кг/м ³	ρ	998,2

Верхний предел скорости водного потока установлен на основании требований к аварийно-спасательной технике в отношении скорости течения преодолеваемого водного потока [164].

В качестве опорной донной поверхности рассматривается слабо заиленный изношенный асфальтобетон с коэффициентом сопротивления качению $0,03 \dots 0,035$ и коэффициентом сцепления $0,65$.

2.3.2 Определение параметров гидростатического воздействия водной среды на машину

Оценка гидростатического воздействия на машину водной среды сводится к определению выталкивающей силы воды при различных глубинах погружения объекта, которая зависит от объемного водоизмещения его затопленной части. Теоретическое определение объемного водоизмещения тела может быть проведено графоаналитическим методом на основе геометрических расчетов или путем численного моделирования [165]. Внешняя геометрическая конфигурация корпуса экскаватора-погрузчика характеризуется сложной пространственной формой с выраженной трехмерной изменчивостью по продольной, вертикальной и поперечной осям, что затрудняет точное определение объемного водоизмещения. В связи с этим была проведена сравнительная оценка достоверности обоих методов путем сопоставления их результатов с результатами эксперимента на физической модели экскаватора-погрузчика.

Графоаналитический метод определения объемного водоизмещения машины базируется на применении математических зависимостей, позволяющих вычислить данный параметр через геометрические характеристики объекта на основе анализа теоретического чертежа. Теоретический чертеж машины представляет собой систему ортогональных проекций корпуса сложной геометрии на три взаимно перпендикулярные плоскости (рисунок 2.9) [130, 162].

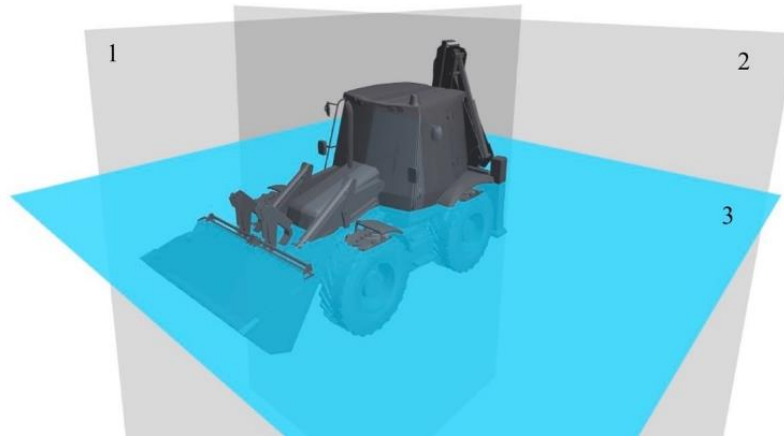


Рисунок 2.9 – Основные плоскости проекций расчетной схемы:

1 – диаметральной (продольная); 2 – мидель-шпангоута (поперечная);

3 – горизонтальная

Длина L и ширина B определяются по корпусу на уровне грузовой ватерлинии (уровень затопления машины). Углубление T это величина погруженной в воду части машины от крайних точек корпуса без учета выступающей ходовой части (колес или гусениц) от грузовой ватерлинии [130].

Приближенно объемное водоизмещение $W_{об}$ рассчитывается по формуле:

$$W_{об} = \delta \cdot L \cdot B \cdot T, \quad (2.25)$$

где δ – коэффициент полноты водоизмещения машины;

L – длина машины, м;

B – ширина машины, м;

T – углубление машины, не учитывающее объем выступающих частей (колес, гусениц, руля и т.п.), м.

Основные размерные параметры машины, преодолевающей водную преграду вброд, представлены на рисунке 2.10.

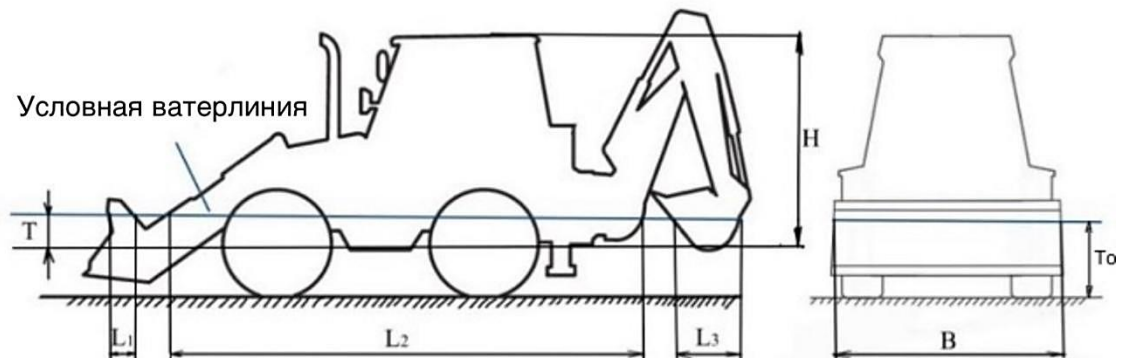


Рисунок 2.10 – Основные размеры машины, преодолевающей водную преграду вброд

Высота борта H определяется как расстояние, измеряемое по вертикали в мидельной плоскости машины от внешней поверхности днища до уровня верхней кромки борта, при этом измерение производится в средней части длины днища.

Осадка борта T_0 характеризует максимальную глубину погружения нижней части машины в опорную поверхность с учетом выступающих конструктивных элементов, таких как гусеничные ленты, опорные катки, колеса и т.п.

Величина коэффициента δ зависит от типа машины, для плавающих машин она составляет 0,7 – 0,85. Ввиду сложной конфигурации затопляемой части машины определение коэффициента водоизмещения для неплавающих машин представляется проблематичным. В такой ситуации целесообразно представить машину совокупностью блоков, каждый из которых обладает относительно несложной конфигурацией.

Тогда зависимость для определения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика принимает вид:

$$W_{\text{ов}} = \delta \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \cdot B \cdot T. \quad (2.26)$$

Поскольку экскаватор-погрузчик имеет сложную конфигурацию, в отличие от судов и плавающих машин при расчете необходимо учитывать и объем его ходовой части. При этом объем колес с пневматическими шинами определяется по их геометрическим размерам [6, 130].

В итоге объемное водоизмещение экскаватора-погрузчика можно представить следующим образом:

$$W_{\text{ов}} = W_{\text{к}} + W_{\text{хч}} + W_{\text{к}} + W_{\text{о}}, \quad (2.27)$$

где $W_{\text{к}}$ – объем корпуса экскаватора-погрузчика, м^3 ;

$W_{\text{хч}}$ – объем ходовой части экскаватора-погрузчика, м^3 ;

$W_{\text{к}}$ – объем погруженной в воду части ковша, м^3 ;

$W_{\text{о}}$ – объем погруженной в воду части отвала, м^3 .

В развитие изложенного подхода предложен упрощенный метод расчета объемного водоизмещения машины по следующему алгоритму:

- левый борт машины разбивается на простые геометрические фигуры, и вычисляются их площади (рисунок 2.11);
- путем умножения площадей на ширину соответствующих элементов определяются объемы каждой фигуры;
- суммированием полученных объемов рассчитывается общее водоизмещение машины.

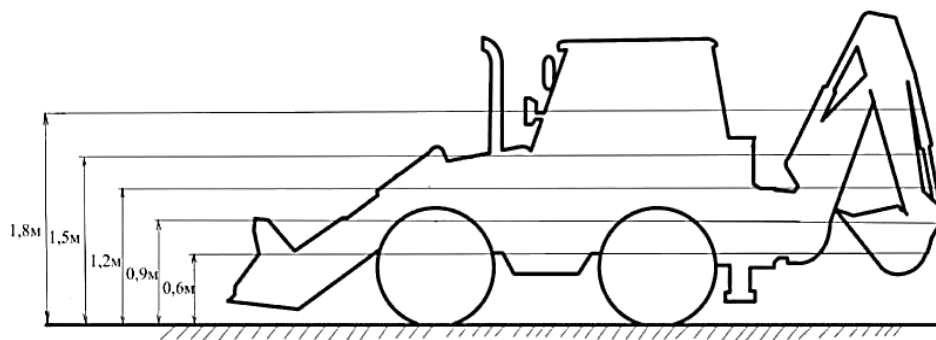


Рисунок 2.11 – Схема разбивания борта машины на блоки для пяти глубин водной преграды

Значения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика для различных глубин затопления, полученные предложенным графоаналитическим методом, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты определения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика графоаналитическим методом

№ п/п	Элемент корпуса	Водоизмещение при глубине водной преграды, $h_{бр}$, м				
		0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
1.	Отвал	0,82	1,16	1,16	1,16	1,16
2.	Гидроцилиндры	0,03	0,06	0,08	0,1	0,1
3.	Колеса	0,60	1,27	1,26	1,26	1,26
4.	Кузов	0,60	3,69	4,52	5,25	5,91
5.	Опора	0,01	0,03	0,06	0,06	0,06
6.	Ковш	0	0,26	0,62	0,62	0,62
7.	Общее объемное водоизмещение, $W_{ов}$, м ³	2,07	6,486	7,72	8,46	9,11

Примененный графоаналитический метод определения объемного водоизмещения представляет собой эффективный инструмент для вычисления гидростатических параметров погруженной части машин с простой геометрией [162]. Графоаналитический метод определения объемного водоизмещения нецелесообразен для ТТМ со сложной и изменяющейся по высоте формой, поскольку он отличается высокой трудоемкостью, сниженной точностью при аппроксимации и слабо учитывает нестандартные конструктивные элементы. В условиях сложной геометрии более эффективными являются современные численные методы, обеспечивающие большую точность и автоматизацию расчетов.

При реализации метода трехмерного моделирования для точного представления геометрических обводов экскаватора-погрузчика использована его упрощенная цифровая модель, разработанная на основе технических характеристик машины JCB 4CX полной массой 8,66 т. Моделирование выполнено в программном комплексе КОМПАС-3D с детализацией основных конструктивных элементов кузова (рисунок 2.12).

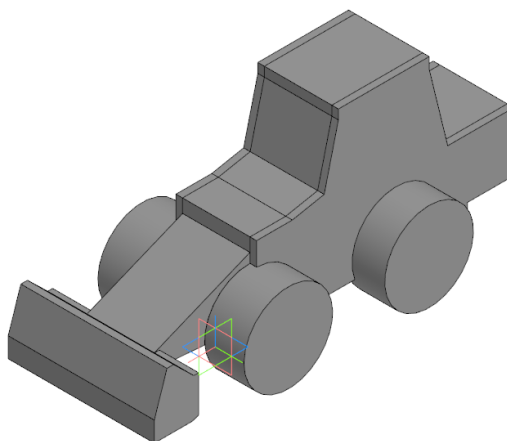


Рисунок 2.12 – Упрощенная 3D-модель экскаватора-погрузчика, построенная в программе КОМПАС 3D

Определение объемного водоизмещения выполнялось на пяти глубинах погружения путем последовательного сечения 3D-модели горизонтальными плоскостями в программе КОМПАС-3D. На рисунке 2.13 показано отделение подводной части машины от надводной на глубине 0,6 м, демонстрирующее принцип расчета вытесненного объема. Полученные в результате расчетов значения объемного водоизмещения для исследуемых глубин погружения представлены в таблице 2.6.

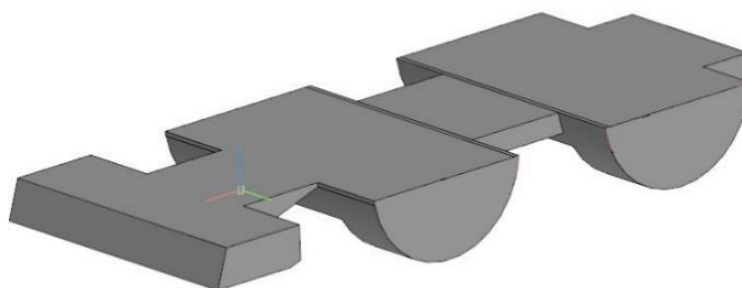


Рисунок 2.13 – Часть экскаватора-погрузчика, погруженная в воду на глубину 0,6 м

Таблица 2.6 – Результаты определения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика методом имитационного моделирования

	Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м				
	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
Объемное водоизмещение, $W_{об}$, м ³	2,88	6,02	8,67	10,42	11,39

В таблице 2.7 представлены результаты сопоставления объемного водоизмещения, полученные с помощью графоаналитического метода и численного моделирования.

Таблица 2.7 – Результаты сопоставления объемного водоизмещения, полученные с помощью графоаналитического метода и численного моделирования

Глубина, $h_{бр}$, м	Графо-аналитический метод, $W_{об}$, м ³	3D-моделирование, $W_{об}$, м ³	Абсолютное отклонение, Δ , м ³	Относительное отклонение, δ , %
0,6	2,07	2,88	+0,81	+39,13
0,9	6,49	6,02	-0,47	-7,24
1,2	7,72	8,67	+0,95	+12,31
1,5	8,46	10,42	+1,96	+23,17
1,8	9,11	11,39	+2,28	+25,02

Сопоставление результатов расчетов по двум методам показало их существенную разность: в диапазоне глубин от 0,9 до 1,8 м – 7...25%, при глубине 0,6 м – 39%. Последнее наиболее значительное различие обусловлено разностью в учете реальной конфигурации ходовой части и днища корпуса машины. Для оценки достоверности обоих методов было проведено экспериментальное исследование методом погружения масштабной модели ТТМ в резервуар с водой. Методика проведения эксперимента и обработки его результатов изложены в главе 3.

Результаты экспериментального определения объемного водоизмещения с учетом пересчета размера модели к реальным размерам экскаватора-погрузчика

для каждого контрольного значения глубины погружения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты определения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика методом погружения

	Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м				
	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
Объемное водоизмещение, $W_{об}$, м ³	2,58	5,68	7,91	9,63	10,49

На рисунке 2.14 показано сравнение объемов водоизмещения, полученных тремя методами при разных глубинах погружения (от 0,6 м до 1,8 м).

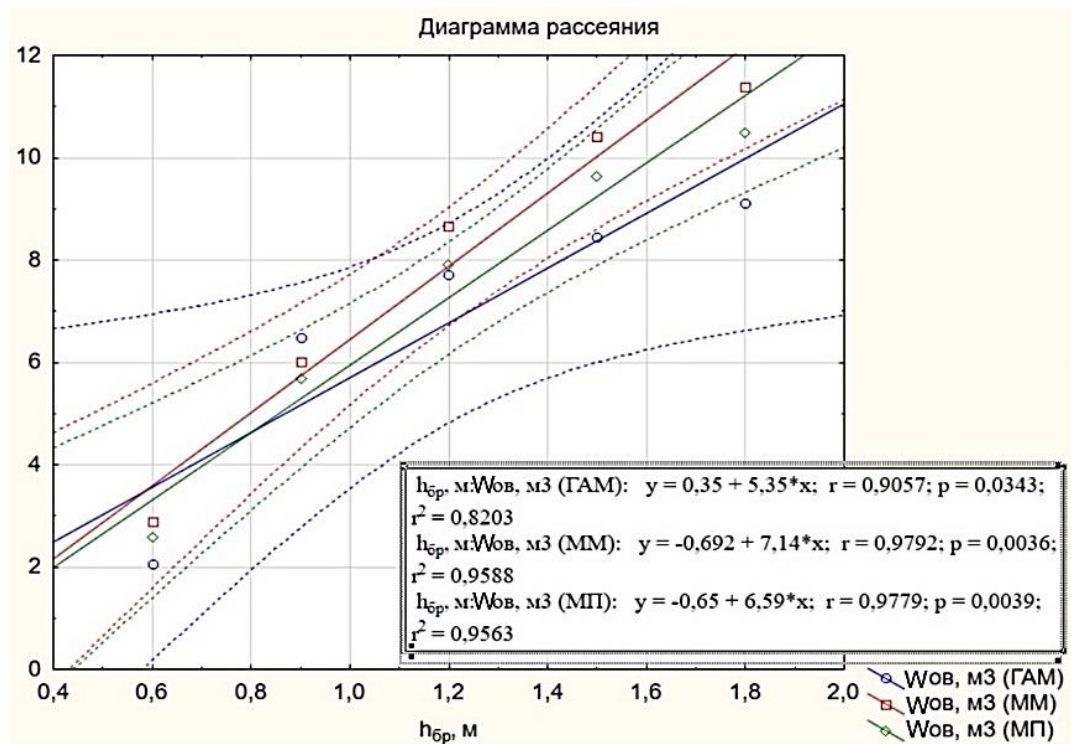


Рисунок 2.14 – График сравнения значений объемного водоизмещения, полученного с помощью трех методов: ГАМ – графоаналитический метод, ММ – метод моделирования, МП – метод погружения

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунке 2.14, демонстрирует высокую степень соответствия между значениями объемного водоизмещения, полученными методом имитационного моделирования и методом

погружения. Расхождение между результатами двух методов не превышает 12% во всем диапазоне исследуемых глубин погружения, что подтверждает адекватность примененных расчетных методик и достоверность полученных экспериментальных данных.

Графоаналитический метод дает существенные различия по сравнению с методом погружения. Это отклонение наиболее заметно на малых и средних глубинах и связано с тем, что при графоаналитическом подходе используется упрощенное геометрическое представление формы объекта. Такие упрощения не позволяют точно учесть все неровности и особенности подводной части конструкции, что особенно критично при увеличении объема вытесненной воды.

Математическая обработка графиков, образованных полученными значениями объемного водоизмещения методом имитационного моделирования и методом погружения, показала возможность их аппроксимации линейными зависимостями:

Метод моделирования с коэффициентом детерминации $r^2 = 0,9792$:

$$W_{\text{ов}} = -0,692 + 7,14 \cdot h_{\text{бр}}. \quad (2.28)$$

Метод погружения с коэффициентом детерминации $r^2 = 0,9779$:

$$W_{\text{ов}} = -0,65 + 6,59 \cdot h_{\text{бр}}. \quad (2.29)$$

В целом, анализ показывает, что метод погружения является наиболее точным и стабильным на всем диапазоне глубин. Численное моделирование может использоваться как альтернатива, особенно после корректной настройки и валидации модели. Графоаналитический метод допустим для предварительных расчетов, однако требует осторожного применения в инженерных задачах, где важна высокая точность.

В виду того, что графоаналитический метод определения объемного водоизмещения наименее точен, а экспериментальный метод погружения является наиболее трудоемким, предлагается для определения объемного водоизмещения ТТМ использовать метод 3D-моделирования.

2.4 Определение параметров гидродинамического воздействия водной среды на машину

2.4.1. Постановка задачи для исследования лобового сопротивления

Определение параметров гидродинамического воздействия водной среды на машину проводилось методом имитационного моделирования.

ТТМ движется прямолинейно через водную преграду в брод по слабдеформируемому основанию с постоянной скоростью движения (рисунок 2.15), при этом водный поток неподвижен.

В поставленной задаче имеет место граница раздела фаз – водной и воздушной, поэтому необходимо производить расчет нескольких фаз, разделенных свободной поверхностью. При движении ТТМ с постоянной скоростью допускается использование принципа обращения движения (рисунок 2.16). Данный принцип позволяет решать задачу в стационарной постановке, предполагая, что объект находится в неподвижном состоянии, а водо-воздушная среда перемещается ему навстречу с заданной для движения машины скоростью. При этом расчетная область имитационного моделирования и сеточная структура остаются неподвижными, что существенно экономит вычислительные ресурсы.

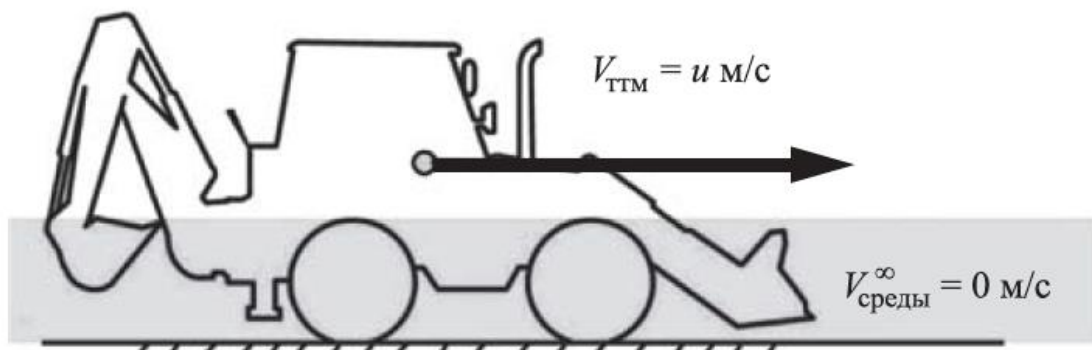


Рисунок 2.15 – Прямолинейное движение через водную преграду вброд по слабдеформируемому основанию

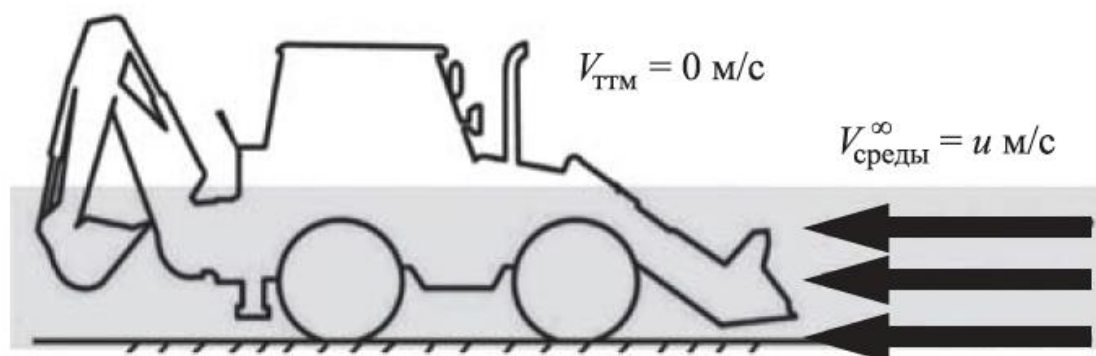


Рисунок 2.16 – Задача в стационарной постановке с обращенным движением

Принятые скорости ТТМ при движении на 1-й и 2-й передачах представлены в таблице 2.9. Исследуемые скорости течения водного потока приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.9 – Исследуемые скорости движения натурального образца на 1-й и 2-й передачах

Параметр	Значение
Скорость движения на 1-й передаче, V_1 , м/с	1,5
Скорость движения на 2-й передаче, V_2 , м/с	3,0

2.4.2 Определение коэффициента сопротивления транспортно-технологической машины в водной среде методом однофазного течения

Описание решения тестовой задачи для отладки решателя представлена в Приложении А.

На подготовительном этапе расчета в модуле ANSYS Fluent Design Modeler была создана упрощенная твердотельная модель ТТМ, содержащая все основные геометрические особенности, представленная на рисунке 2.17, размеры которой равны: $L = 5,91\text{ м}$; $H = 3,03\text{ м}$; $B = 2,22\text{ м}$ [143].

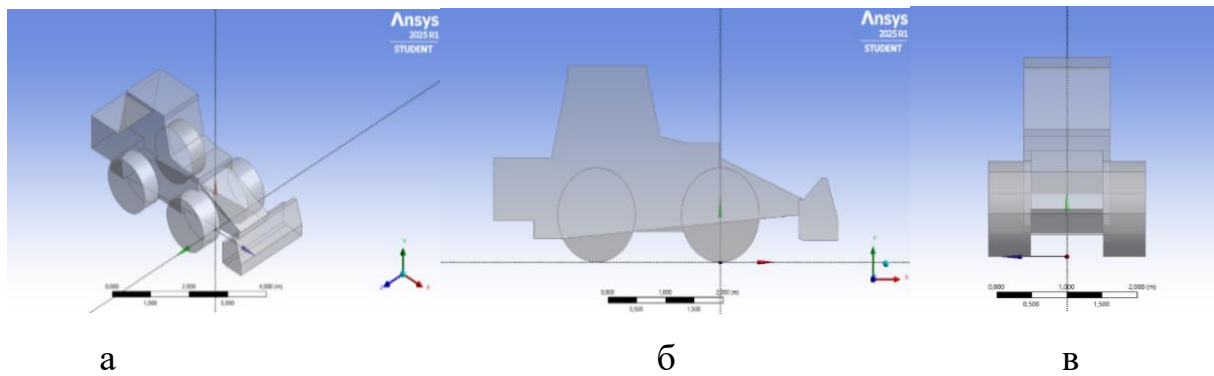


Рисунок 2.17 – Упрощенная геометрия ТТМ в модуле ANSYS Fluent Design Modeler: а) аксонометрия; б) продольная боковая поверхность; в) лобовая поверхность

Для расчетов течения жидкости произведено построение геометрии объема самой жидкости, а не обтекаемого тела ТТМ. При этом твердое тело ТТМ представлено в виде «полости» в этом жидком объеме (рисунок 2.18).

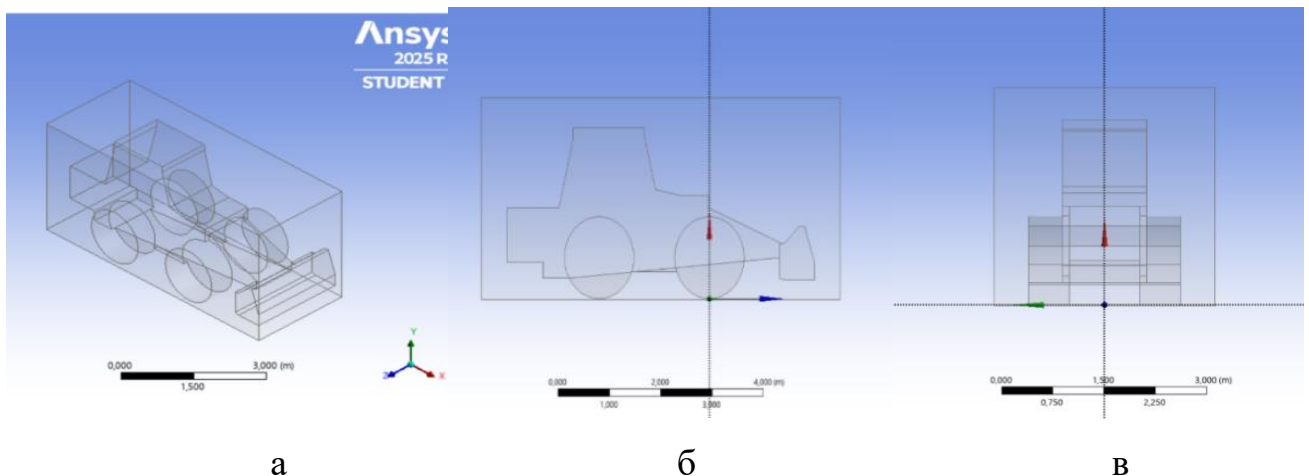
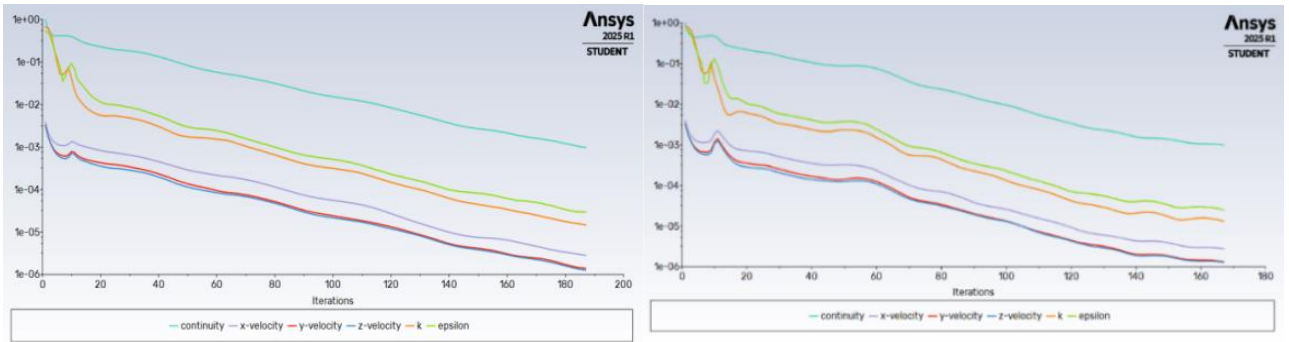


Рисунок 2.18 – Геометрия канала с полостью в форме ТТМ: а) аксонометрия; б) продольная проекция; в) фронтальная проекция

Расчет проводился по методике, описанной в Приложении А, с контролем установленных в ней параметров.

Результаты невязок для однофазного расчета с рабочей средой – вода, представлены на рисунке 2.19.

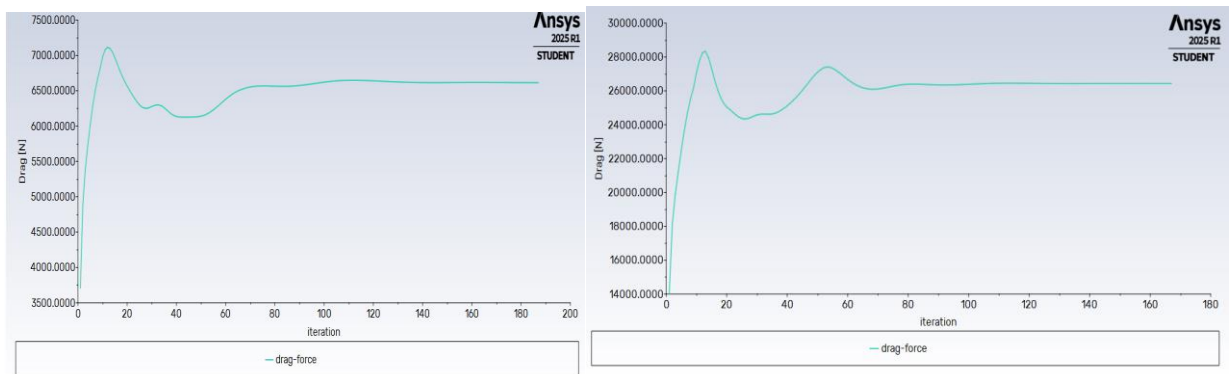


а

б

Рисунок 2.19 – Невязки в случае лобового обтекания ТТМ водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

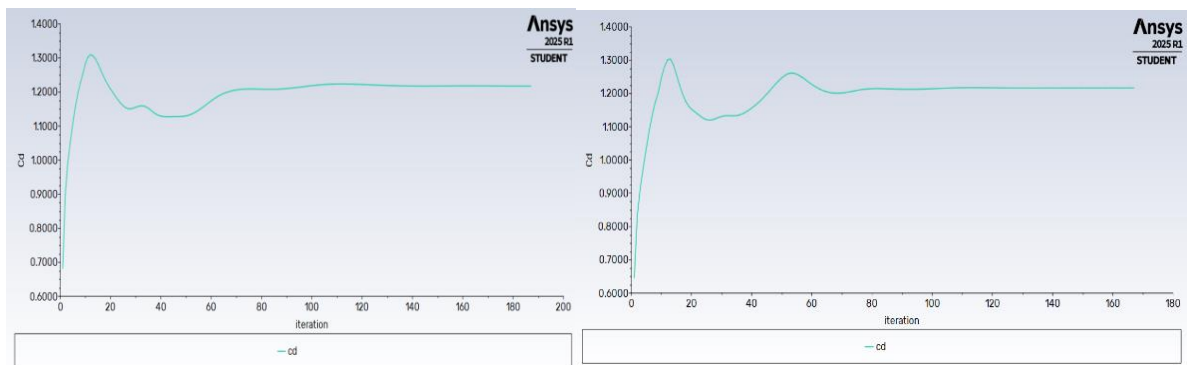
Результаты контролируемых параметров при однофазном обтекании – водой, представлены на рисунках 2.20 – 2.21.



а

б

Рисунок 2.20 – Сила сопротивления при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с



а

б

Рисунок 2.21 – Коэффициент сопротивления при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Контроль условий глобальных балансов представлены на рисунках 2.22 – 2.23.

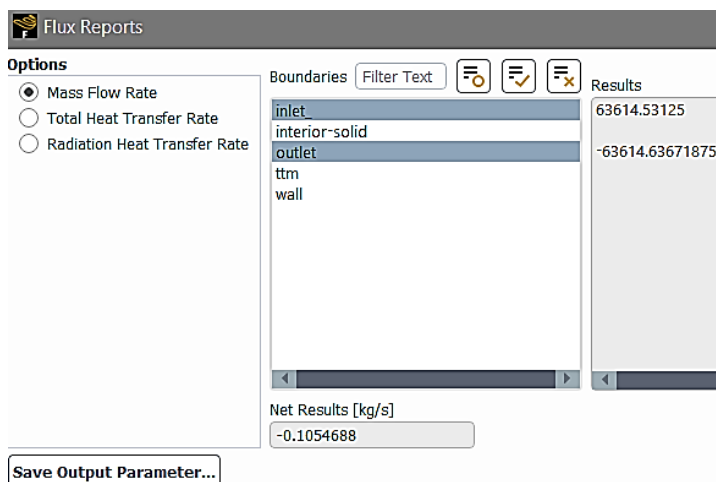


Рисунок 2.22 – Массовый расход среды на входе (inlet) и выходе (outlet) из канала при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростью 1,5 м/с

Разность в расходе воды на входе и выходе в расчетную область составила 0,1054, что меньше 0,00016%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся.

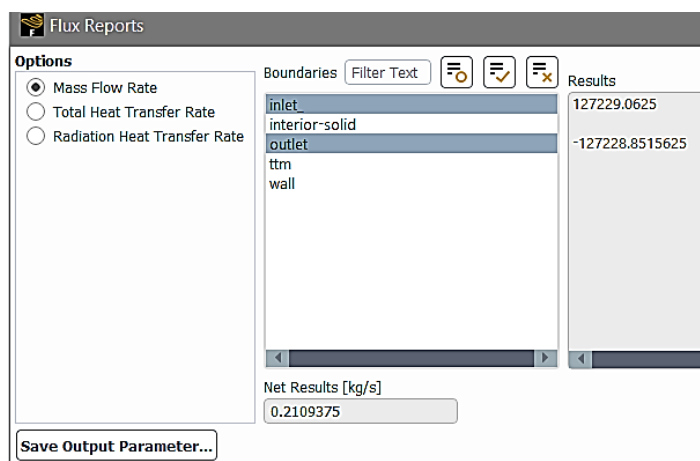


Рисунок 2.23 – Массовый расход среды на входе (inlet) и выходе (outlet) из канала при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростью 3 м/с

Разность в расходе воды на входе и выходе в расчетную область составила 0,2109, что меньше 0,00016%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся.

Результаты расчета представлены на рисунках 2.24 – 2.25.

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
ttm	Pressure	Pressure
	6561.9077	1.2077274

Net	6561.9077	1.2077274

Рисунок 2.24 – Результаты расчета при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростью 1,5 м/с

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
ttm	Pressure	Pressure
	26243.223	1.2075246

Net	26243.223	1.2075246

Рисунок 2.25 – Результаты расчета при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростью 3 м/с

Распределение давления воды на лобовую поверхность ТТМ представлено на рисунке 2.26.

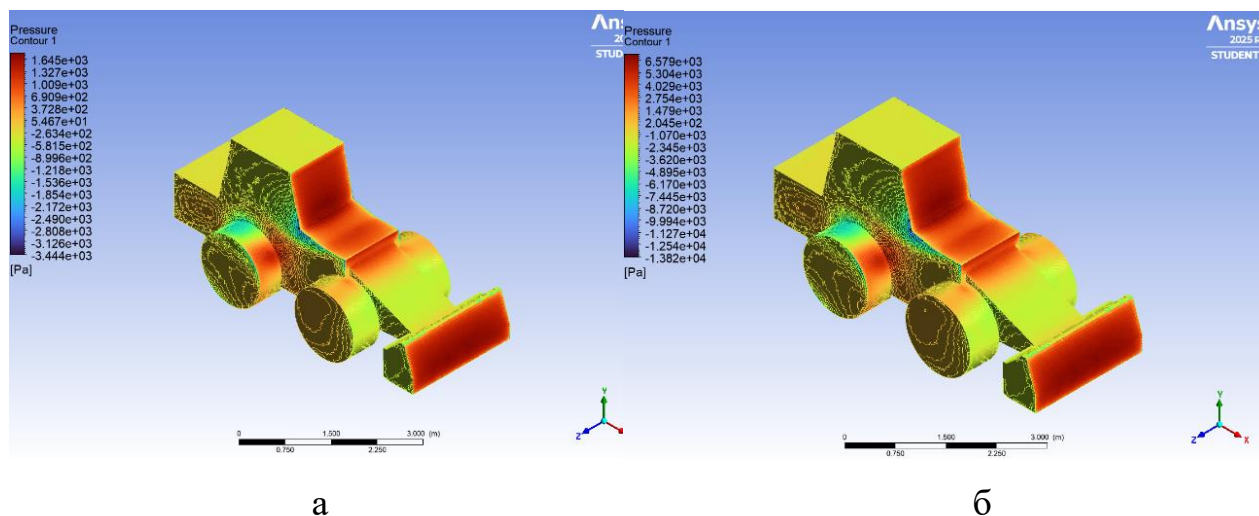


Рисунок 2.26 – Распределение давления воды на лобовую поверхность ТТМ при скоростях обтекания: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Расчетные значения коэффициента лобового сопротивления при стационарном однофазном обтекании приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты определения коэффициентов сопротивления при лобовом обтекании

	Скорости водного потока, м/с	
	$V_1 = 1,5$ м/с	$V_2 = 3,0$ м/с
C_x	1,207	1,207

Аналогичным образом был проведен расчет для определения коэффициентов сопротивления боковой поверхности водному потоку для значений его скоростей в диапазоне от 0,5 до 2,5 м/с.

Распределение давления воды на боковую поверхность ТТМ при скорости обтекания 1,5 м/с представлено на рисунке 2.27.

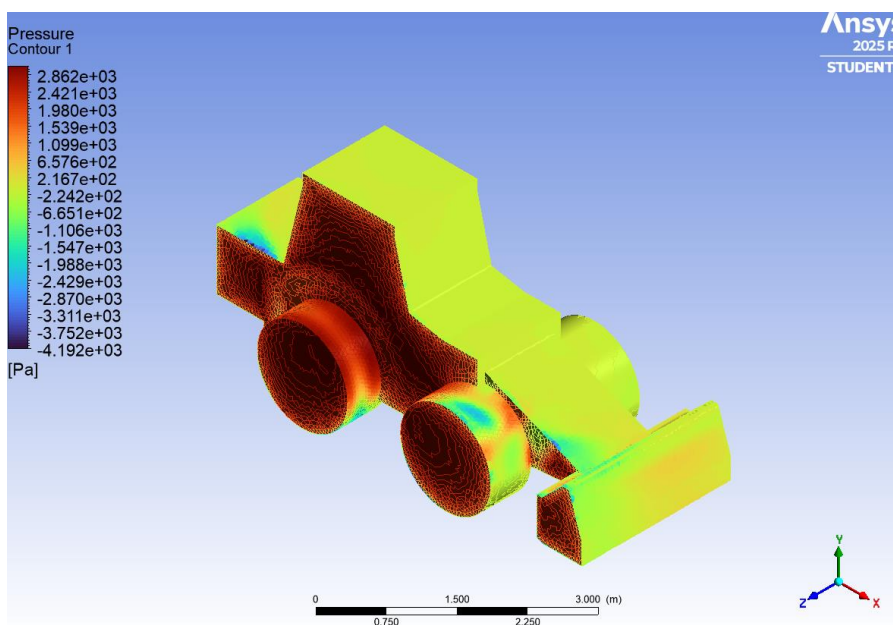


Рисунок 2.27 – Распределение давления воды на боковую поверхность ТТМ при скорости обтекания 1,5 м/с

Расчетные значения коэффициента бокового сопротивления при стационарном однофазном обтекании приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Результаты определения коэффициентов сопротивления при боковом обтекании

	Скорости водного потока, м/с				
	$V_{вп1} = 0,5$	$V_{вп2} = 1,0$	$V_{вп3} = 1,5$	$V_{вп4} = 2,0$	$V_{вп5} = 2,5$
C_y	1,967	1,967	1,953	1,931	1,933

2.4.3 Определение коэффициента сопротивления транспортно-технологической машины методом моделирования двухфазного обтекания

Для численного моделирования многофазных течений с использованием программного комплекса ANSYS Fluent для решения рассматриваемой задачи применялись методы объема жидкости Volume of Fluid (далее – VOF) и модель турбулентности k-ε Standart [165, 166, 167].

Данные методы, основаны на решении трех систем уравнений движения (Flow, Volume fraction, k-ε Standart) для всех присутствующих фаз, позволяют отслеживать относительные объемные доли каждой фазы в каждой точке расчетной области [167].

Расчет производился в стационарной постановке методом установления псевдостационарной постановки PseudoTransient с подключением многофазной модели с расчетом границ свободной поверхности VOF в неявной постановке (implicit) и подмоделью Open Flow Channel.

Для моделирования турбулентности использовалась модель k-ε Standart, схема решателя Pressure-Based Coupled. Для расчета свободной поверхности использовалась схема высокой точности BGM, схема дискретизации имеет второй порядок точности. В процессе расчета числа Куранта принимались равными 50, коэффициенты релаксации 0,5. Параметр, отвечающий за величину шага по времени (Pseudo Time Step), принимался равным 0,001 – 0,05. Сходимость расчета достигалась в диапазоне 800 – 1500 итераций.

Для расчета многофазной модели была построена удлиненная геометрия расчетной области с целью избежать возвратных потоков из-за близко установленной выходной плоскости к ТТМ. Канал имеет размеры $L=19$ м; $B=6,2$ м; $H = 5,3$ м. (рисунок 2.28).

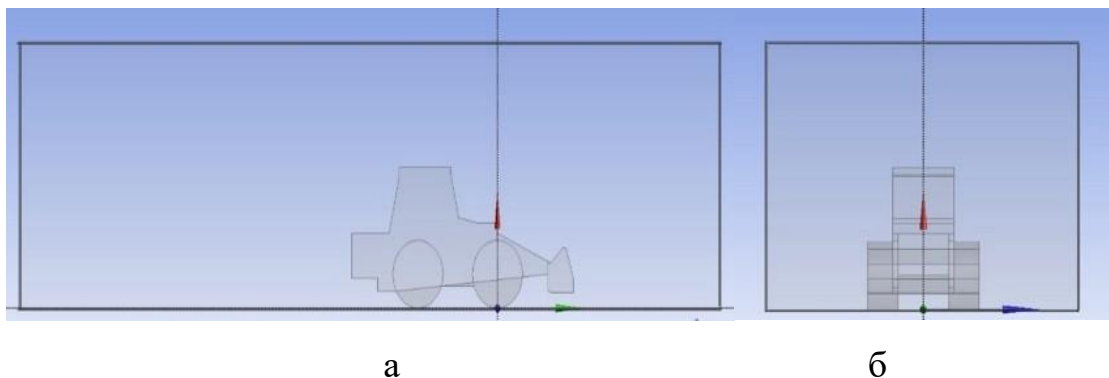


Рисунок 2.28 – Геометрия расчетной области

Входной границе (Inlet) присваивалось граничное условие – pressure inlet. Выходной границе (Outlet) присваивалось граничное условие – pressure outlet. Верхней границе (atmosphere) присваивалось граничное условие – pressure outlet. Боковым границам (Wall), нижней границе (bottom) и ТТМ (track_wall) – solid.

Сеточная структура имеет полиэдральное строение, общее количество ячеек – 725123 (рисунки 2.29 – 2.31) [168, 169].

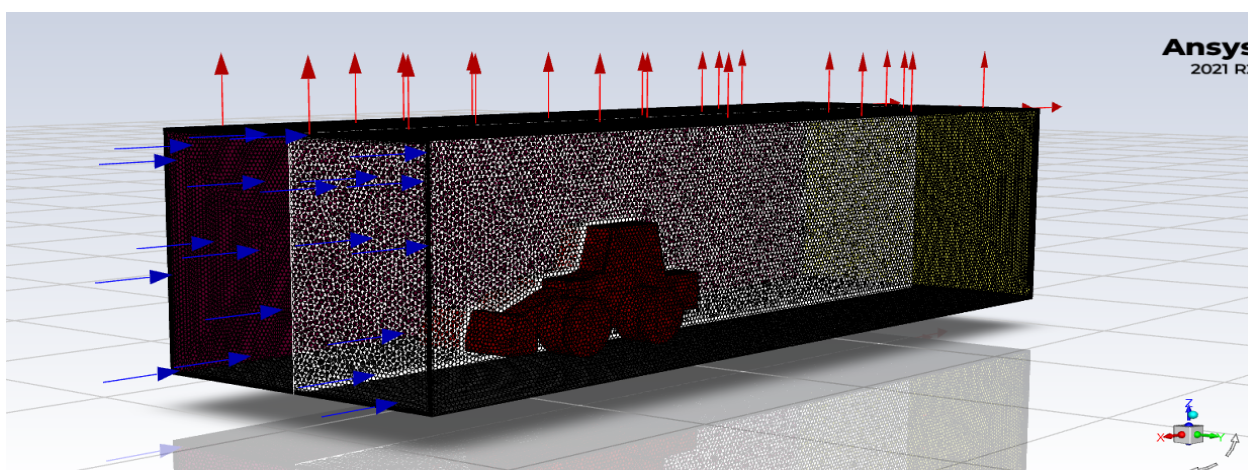


Рисунок 2.29 – Сеточная структура в модуле ANSYS Meshing: аксонометрия

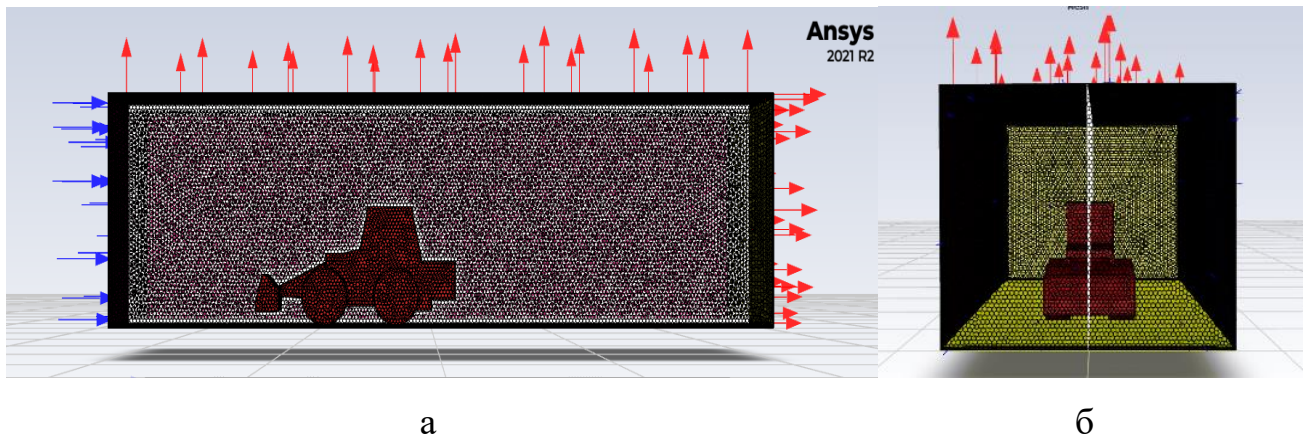


Рисунок 2.30 – Сеточная структура в модуле Ansys Meshing:

а) продольная поверхность; б) лобовая поверхность

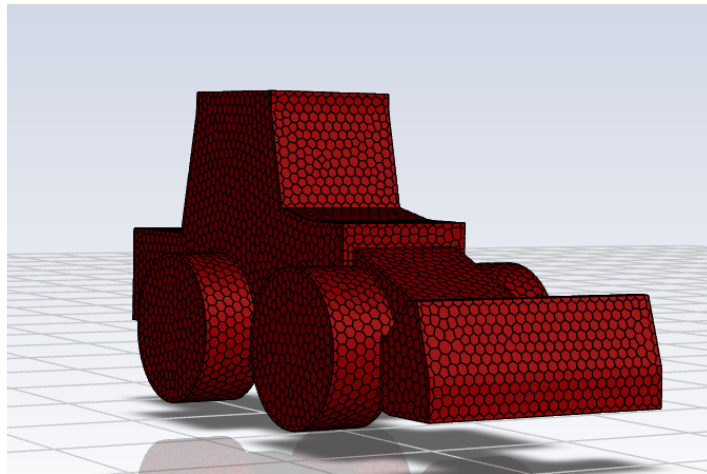


Рисунок 2.31 – Сеточная структура ТТМ

В настройках решателя задавались исследуемые скорости течения, и глубина водной преграды как уровень раздела жидкой (синий цвет) и воздушной (серый цвет) фазы (рисунки 2.32 – 2.33).

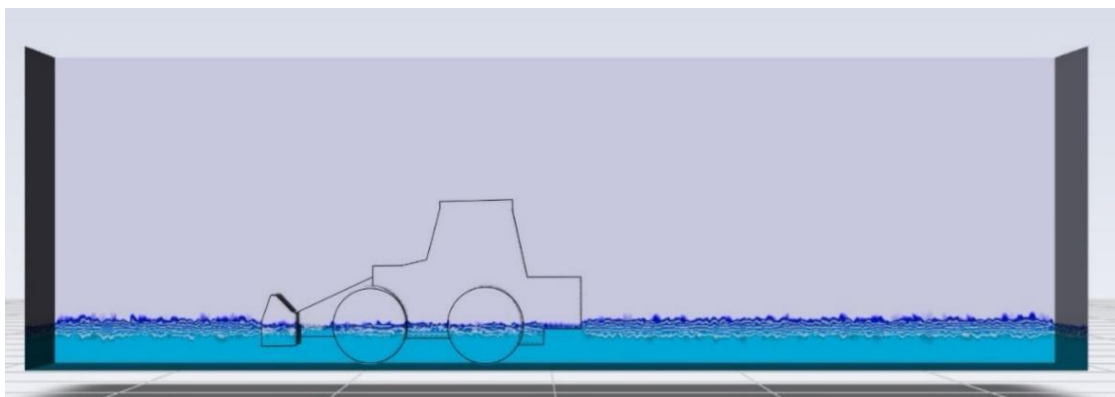


Рисунок 2.32 – Граница раздела фаз для водной преграды глубиной 0,6 м

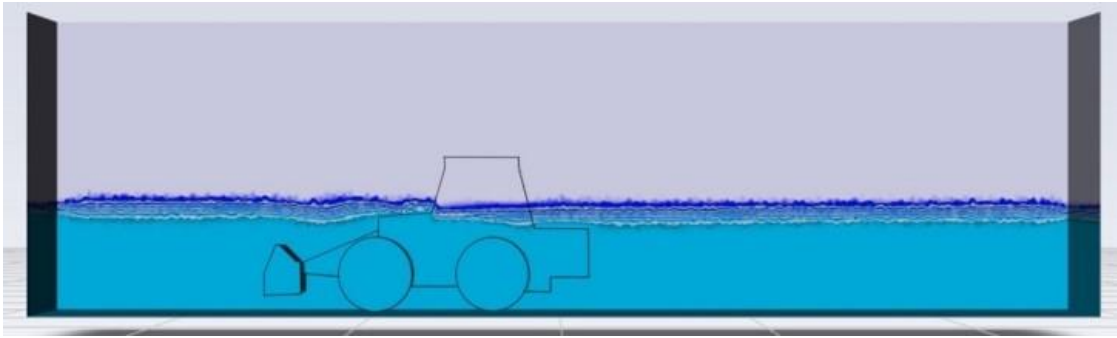


Рисунок 2.33 – Граница раздела фаз для водной преграды глубиной 1,8 м

Контроль сходимости решения определялся по стабилизации контролируемых параметров – коэффициента сопротивления (рисунок 2.34) и массового расхода фаз в расчетной области (рисунки 2.35 – 2.36).

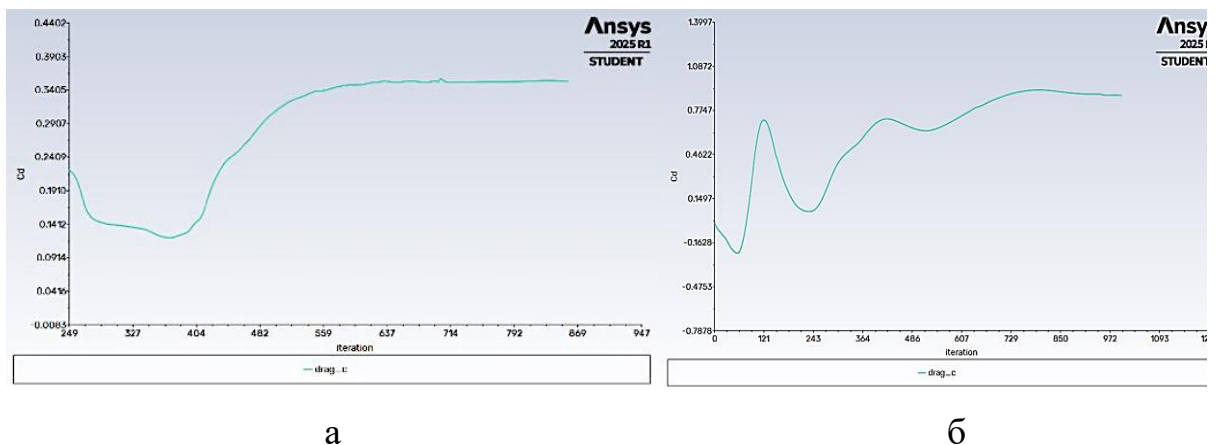


Рисунок 2.34 – Коэффициент сопротивления при лобовом обтекании ТТМ водой со скоростью 3 м/с при глубине водной преграды: а) 0,6 м; б) 1,8 м

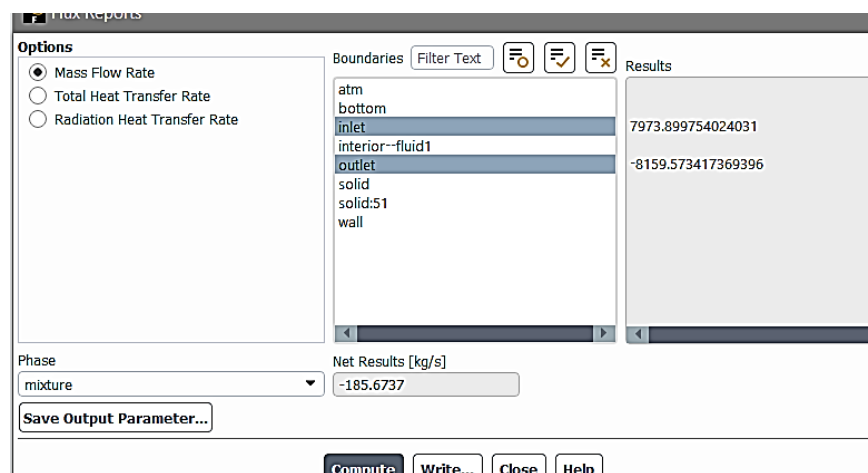


Рисунок 2.35 – Массовый расход водной и воздушной фаз при лобовом обтекании на скорости 3 м/с для глубины водной преграды 0,6 м

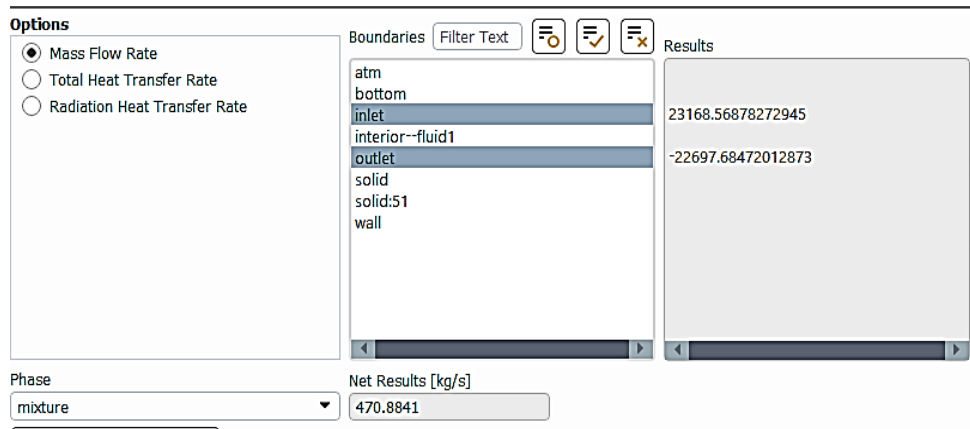


Рисунок 2.36 – Массовый расход водной и воздушной фаз

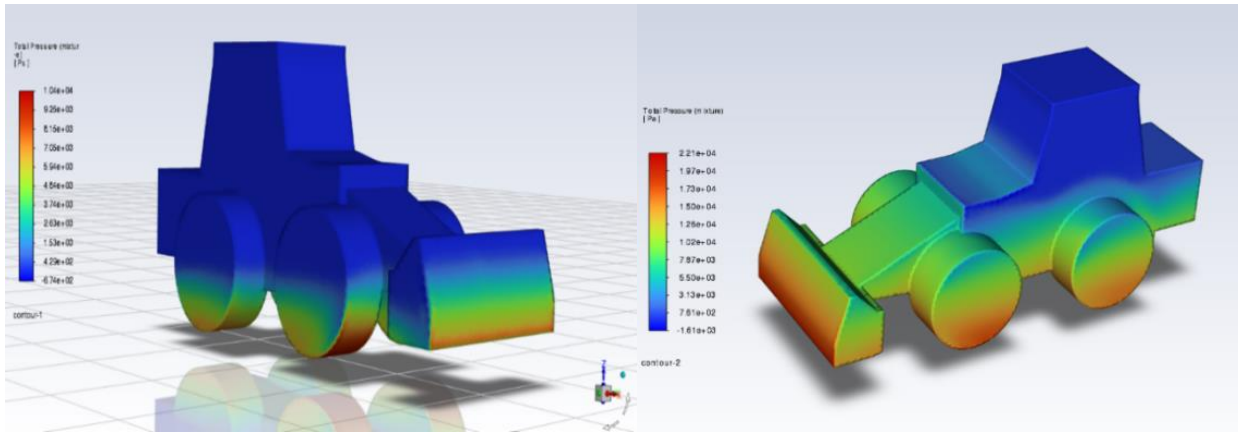
при лобовом обтекании на скорости 3 м/с для глубины водной преграды 1,8 м

Разность в расходе фаз на входе и выходе в расчетную область для каждого расчетного случая не превышала 2,5%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача для всех исследуемых случаев является сошедшейся. Результаты расчетов коэффициента сопротивления при лобовом двухфазном обтекании представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Коэффициенты сопротивления при лобовом двухфазном обтекании

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	Скорости водного потока, м/с		
	$V_1=1,5$ м/с	$V_2=3$ м/с	C_x^{cp}
0,6	0,35	0,36	0,36
0,9	0,52	0,51	0,52
1,2	0,63	0,65	0,64
1,5	0,86	0,87	0,87
1,8	0,87	0,88	0,88

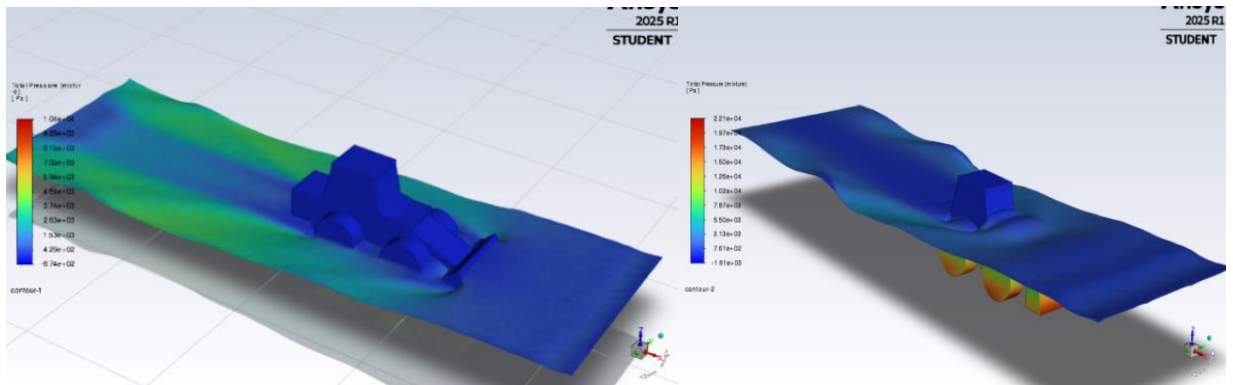
Для каждого расчетного случая было получено распределение давления фаз (рисунок 2.37), а также смоделирована свободная поверхность воды с расходящимися волнами (рисунок 2.38).



а

б

Рисунок 2.37 – Распределение давления фаз на поверхность ТТМ при скорости обтекания 3 м/с при глубине водной преграды: а) 0,6 м; б) 1,8 м



а

б

Рисунок 2.38 – Смоделированная свободная поверхность воды при скорости обтекания 3 м/с при глубине водной преграды: а) 0,6 м; б) 1,8 м

Для определения коэффициентов сопротивления при обтекании боковой поверхности на различных глубинах водной преграды применялся аналогичный методический подход. С целью оптимизации вычислительных процессов количество рассматриваемых скоростей потока было сокращено: вместо пяти исходных вариантов анализ проводился для трех ключевых значений – 0,5; 1,5 и 3 м/с. Данный выбор позволил сохранить репрезентативность результатов при одновременном снижении ресурсозатрат, обеспечив изучение зависимости гидродинамических характеристик от скорости в диапазонах, соответствующих типичным условиям эксплуатации. Оптимизация расчетной схемы способствовала

ускорению обработки данных без существенной потери точности, что особенно важно при моделировании процессов на множественных глубинах. Результаты расчетов коэффициента сопротивления при боковом двухфазном обтекании представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Коэффициенты сопротивления при боковом двухфазном обтекании

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	Скорости водного потока			
	$V_1 = 0,5$ м/с	$V_2 = 1,5$ м/с	$V_3 = 3$ м/с	C_y^{cp}
0,6	0,37	0,38	0,38	0,38
0,9	0,79	0,80	0,81	0,80
1,2	1,13	1,13	1,14	1,13
1,5	1,35	1,35	1,35	1,35
1,8	1,67	1,67	1,68	1,67

Постоянство коэффициентов лобового и бокового сопротивления при изменении скорости обтекания при однофазном и двухфазном течениях свидетельствует о переходе течения в режим автомодельности, при котором безразмерные аэродинамические характеристики становятся инвариантными к числу Рейнольдса. Это явление характерно для объектов с устойчивой аэродинамической формой или турбулентным пограничным слоем, где влияние вязких сил пренебрежимо мало.

Таким образом, проведенное численное моделирование однофазного и двухфазного течений позволило определить коэффициенты лобового и бокового сопротивления для исследуемых скоростей движения ТТМ на 1-й и 2-й передачах, а также при скоростях бокового течения от 0,5 м/с до 3 м/с. Установлено, что полученные значения коэффициентов сопротивления не зависят от скорости, что может указывать на режим автомодельности. Для подтверждения достоверности результатов необходима валидация методом аэродинамического эксперимента,

которая позволит уточнить расчетные данные и оценить применимость модели в реальных условиях.

Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель движения самоходной колесной машины типа 4x4 вброд по слабдеформируемому донному основанию, интегрирующая уравнения динамики движения ТТМ с гидродинамическими воздействиями на нее водной среды.

2. Реализация модели позволяет определять параметры воздействия водной среды (глубины затопления и скорости течения), ограничивающие подвижность машины при заданной скорости ее движения.

3. Разработаны методики расчетного определения факторов гидростатического и гидродинамического взаимодействия машины с водной средой – объемного водоизмещения образца ТТМ, коэффициентов его лобового и бокового гидродинамического сопротивления при различных уровнях затопления, скоростях движения машины и водного потока.

4. Установлена целесообразность использования для расчета объемного водоизмещения машины метода численного имитационного моделирования, обеспечивающего получение более достоверных результатов в сравнении с графоаналитическим методом. Выведена регрессионная зависимость объемного водоизмещения от глубины погружения для экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX.

5. Разработанные имитационные модели для расчета сил и коэффициентов лобового и бокового гидродинамического сопротивления учитывают, как форму ТТМ, так и особенности двухфазного течения среды «вода-воздух». Применение методов однофазного и двухфазного моделирования позволило уточнить коэффициенты сопротивления машины, выявив их зависимость от скорости движения, глубины погружения и турбулентности потока на примере экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX.

6. Оптимизация вычислительных процедур, в частности, сокращение числа исследуемых скоростей течения до трех ключевых значений (0,5; 1,5 и 3 м/с), обеспечила баланс между точностью результатов и ресурсоемкостью расчетов.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРОДОХОДИМОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Целью экспериментального исследования параметров взаимодействия ТТМ с водной средой является определение характеристик водоизмещения и гидродинамических сопротивлений, возникающих при преодолении водных преград вброд.

Для достижения поставленной цели решались ниже представленные научные задачи.

1. Определение экспериментальных значений исходных гидродинамических параметров, необходимых для разработки и верификации имитационных моделей движения ТТМ в водной среде:

- объемное водоизмещение;
- коэффициенты лобового и бокового гидродинамического сопротивления;
- момент рысканья.

2. Оценка достоверности разработанного расчетного метода путем сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования: выявление расхождений и ошибок в применении упрощенных инженерных формул.

В качестве методического подхода использованы экспериментальные исследования на физических масштабных моделях ТТМ, реализованные для определения объемного водоизмещения в специально оборудованной ванне, а для определения гидродинамических характеристик – в аэродинамической трубе (далее – АДТ).

3.2 Экспериментальное исследование факторов гидростатического воздействия водной среды на транспортно-технологическую машину

Локальная цель исследования заключается в определении объемного водоизмещения ТТМ при различных глубинах погружения в водную среду, что необходимо для расчета выталкивающей силы воды, как одного из факторов оценки глубины безопасного погружения [162, 170].

Объектом исследования является геометрически подобная модель ТТМ, изготовленная в масштабе 1:16, обладающая типичной конфигурацией обводов корпуса колесной машины (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Физическая модель экскаватора-погрузчика JCB 4CX
в масштабе 1:16

В ходе исследования было использовано следующее оснащение.

1. Масштабная модель ТТМ в масштабе 1:16. Все внутренние полости модели были загерметизированы для исключения проникновения воды.
2. Резервуар для погружения модели – прозрачный поликарбонатный контейнер прямоугольной формы объемом 25 литров с геометрическими параметрами 530×370×160 мм. Контейнер характеризуется точным углом отклонения боковых стенок 4,5° и установлен на ровной опорной поверхности.
3. Измерительная система определения глубины погружения на основе угломерного инструмента с диапазоном измерений 300 мм и погрешностью не более 0,5 мм. Инструмент закреплен на дне резервуара с соблюдением строгой вертикальности (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Оборудование для проведения экспериментального определения объемного водоизмещения

Методика проведения эксперимента.

1. Подготовительный этап: наполнение резервуара водой до требуемого уровня частичного погружения модели, приведенного к исследуемым уровням погружения натурального образца с учетом масштаба модели экскаватора-погрузчика 1:16 (результаты приведения уровня погружения модели представлены в таблице 3.1); измерение начального уровня воды h_1 по шкале угольника (в соответствии с заданными значениями глубин погружения модели).

2. Основной этап: погружение модели машины в резервуар с водой без разбрызгивая воды и касания стенок; измерение уровня воды h_2 после стабилизации ее поверхности.

3. Обработка результатов – расчет объема водоизмещения по результатам пяти замеров для каждой глубины:

— определение разности уровней

$$\Delta h = h_1 - h_2, \quad (3.1)$$

— определение объема вытесненной воды (он равен объему погруженной части модели)

$$V_{\text{ов}} = S \cdot \Delta h, \quad (3.2)$$

где S – площадь поперечного сечения резервуара, м^2 .

Площадь поперечного сечения для каждого значения исследуемой глубины определялась с учетом наклона стенок резервуара (таблица 3.1). Изменение площади поперечного сечения при изменении уровня воды после опускания модели в резервуар не учитывалось ввиду малого значения.

Таблица 3.1 – Результаты замеров уровня воды в резервуаре до и после погружения машины

№ опыта	Глубина водной преграды для натуре, $h_{бр}$ м	Глубина погружения модели, h_1 , м	Разность уровней до и после погружения $\Delta h = h_2 - h_1$, мм						Площадь сечения резервуара S , m^2	Объем водоизмещения модели, $W_{об}^M$, m^3	Объем водоизмещения натуре, $W_{об}$, m^3
			Номер повторения								
			1	2	3	4	5	$\Delta h_{ср}$			
1	0,6	0,038	2	5	3,5	4,5	5	4	0,154	0,000616	2,52
2	0,9	0,056	7,5	8,5	10,5	9,5	9	9	0,156	0,00141	5,76
3	1,2	0,075	11,5	12,5	13,5	13	12	12,5	0,159	0,00199	8,13
4	1,5	0,094	13	15,5	16	16	14,5	15	0,161	0,00242	9,90
5	1,8	0,113	16,5	17	15,5	17,5	16	16,5	0,164	0,00270	11,06

По результатам проведенных опытов построен график рассеяния значений объемного водоизмещения натурального образца ТТМ в зависимости от глубины его погружения (рисунок 2.13), представленный в главе 2. Для оценки достоверностей использованных расчетных методов на него нанесены графики рассеяния, полученные графоаналитическим методом и методом имитационного моделирования.

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями показало незначительные расхождения, находящиеся в пределах допустимой погрешности, что подтверждает вывод, сделанный в главе 2, о целесообразности использования методики имитационного моделирования и корректность разработанной 3D-модели.

3.3 Исследование факторов гидродинамического воздействия водной среды на транспортно-технологическую машину

3.3.1 Цель и задачи экспериментального исследования, методика проведения и система обработки результатов

Экспериментальное определение на натуральных образцах ТТМ коэффициентов лобового гидродинамического сопротивления не представляет сложности и проводится методом их буксировки в мелководном бассейне с регулируемым уровнем затопления при движении с рекомендуемыми эксплуатационными скоростями [25]. Определение же коэффициентов бокового сопротивления на натуральных образцах сопряжено со значительными трудностями и затратами, обусловленными сложностью организации натурального эксперимента. В этом случае, как правило, проводится эксперимент на физических моделях образцов с их буксировкой в водной среде на технологической тележке при поперечном расположении модели относительно продольной оси движения тележки по дну опытного лабораторного бассейна [25]. При этом пересчет получаемых экспериментальных данных применительно к натуральным образцам производится в соответствии с законами подобия. Альтернативой изложенным методам может быть метод, основанный на исследовании аэродинамических коэффициентов сопротивления, широко используемый при оценке коэффициентов обтекаемости и выталкивающей силы при создании речных и морских судов [170, 171]. Движение ТТМ в воздушной среде сопровождается достаточно сложным процессом взаимодействия с окружающим воздухом, который в аэродинамике дозвуковых

течений может рассматриваться как сплошная жидкая среда с постоянной плотностью и вязкостью, то есть при малых относительных скоростях потока, обтекающего модель, значения коэффициентов обтекаемости моделей в воздушной среде и в жидкости будут одинаковы. Это допущение положено в основу метода, использованного при исследовании физической модели ТТМ в АДТ [172].

Локальной целью исследования являлось определение коэффициентов лобового (C_x), бокового (C_y) гидродинамического сопротивления и коэффициента момента рысканья (C_{mz}) ТТМ при движении в водной среде в зависимости от угла обтекания (набегания потока) модели (β), изменяемого с шагом в 30° , и с учетом различной степени «погружения» модели, реализуемой ее «послойной» обдувкой.

В качестве объекта экспериментальных исследований выбрана масштабная модель репрезентативного образца ТТМ, широко применяемой для проведения аварийно-спасательных операций в зонах затопления — полноприводный экскаватор-погрузчик с равновеликими колесами и колесной формулой 4×4. Моделируется движение машины через водную преграду с постоянной скоростью. Учтены два режима гидродинамического воздействия: статическая водная среда и поток с заданной скоростью течения. Для анализа пространственного положения машины в процессе взаимодействия с водной средой принята земная система координат OXYZ с началом в центре масс машины (рисунок 3.3).

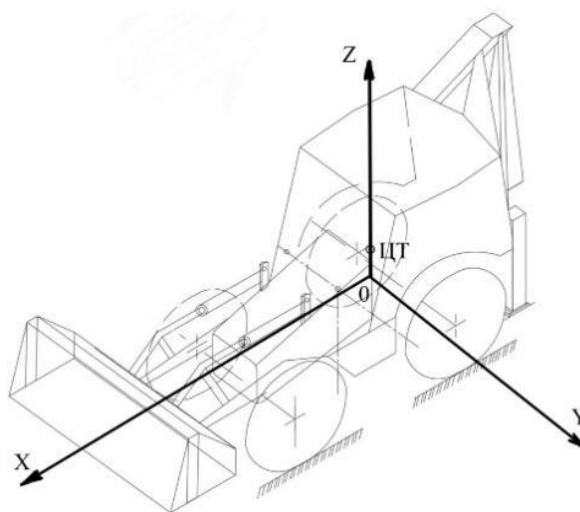


Рисунок 3.3 – Положение машины в принятой системе координат

Оборудование и методика экспериментального исследования:

- АДТ замкнутого цикла с открытой рабочей частью;
- аэродинамические весы – четырехкомпонентный динамометр для измерения силы лобового и бокового сопротивления и момента рысканья;
- поворотный стол с шагом 30° , позволяющий точно задавать угол набегания потока воздуха на модель;
- системы сбора и обработки данных – тензометрические датчики, преобразователи сигналов, программное обеспечение для их обработки.

Перед началом испытаний производится тарировка оборудования и проверка плоско-параллельности потока.

Методика проведения эксперимента

1. Подготовка и установка модели. Модель устанавливается на рабочем участке аэродинамической трубы на поворотной платформе. Нижние слои модели последовательно удаляются для имитации частичного погружения.

2. Измерение составляющих сопротивления:

- подача равномерного плоскопараллельного воздушного потока на модель;
- регистрация силы сопротивления и момента при различных углах обтекания.

3. Обработка результатов. Измеренные величины продольной и боковой составляющих сил и момент относительно центра тяжести модели приводятся к безразмерному виду по формулам:

- для продольной силы:

$$C_x = \frac{X \cdot k_x}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}^2 \cdot A_m}, \quad (3.3)$$

- для боковой силы:

$$C_y = \frac{Y \cdot k_y}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}^2 \cdot A_m}, \quad (3.4)$$

— для момента:

$$C_m = \frac{M \cdot k_m}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}^2 \cdot A_m \cdot L_m}, \quad (3.5)$$

где X , Y , M – соответственно продольная составляющая силы давления воздушного потока, боковая составляющая и момент силы относительно центра тяжести, определенные экспериментально;

k_x, k_y, k_m – калибровочные коэффициенты (устанавливаются в процессе наладки измерительной аппаратуры);

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха, кг/м³;

$V_{\text{возд}}$ – скорость набегающего потока, м/с;

A_m – площадь мишени (площадь проекции на плоскость, перпендикулярную оси потока), м²;

L_m – длина (ширина) модели в зависимости от положения обтекания, м.

В ходе тарирования аэродинамических весов были получены следующие значения калибровочных коэффициентов:

$$K_x = 0,1204 \text{ Н/дел};$$

$$K_y = 0,1302 \text{ Н/дел};$$

$$K_m = 0,1056 \text{ Н} \cdot \text{мм/дел}.$$

При изменении угла обтекания (набегания потока) β в аэродинамической трубе, измеренные в поточной системе координат трубы компоненты аэродинамических характеристик необходимо пересчитать в связанной системе координат модели (XYZ):

$$F_{\text{лоб}} = X \cdot \cos\beta + Y \cdot \sin\beta, \quad (3.6)$$

$$F_{\text{бок}} = -X \cdot \sin\beta + Y \cdot \cos\beta. \quad (3.7)$$

Момент рысканья не требует пересчета, если: центр тяжести и точка крепления лежат на одной вертикали; силы действуют в плоскости XY (а не наклонно); перенос происходит вдоль оси вращения – в данном случае, оси Z. Это физически означает: если точка приложения силы и ось вращения находятся на

одной прямой (оси Z), то сила не создает дополнительного рысканья, так как не имеет плеча относительно оси вращения. Поскольку расстояние от динамометра до центра тяжести лежит только по вертикали (ось Z), то момент рысканья не изменится, потому что момент вокруг оси Z создается только силами в плоскости XY , и для пересчета нужно горизонтальное смещение.

С учетом полученных коэффициентов расчет гидродинамических сил и моментов, действующих на натурный образец ТТМ, производится по формулами:

— лобовая сила:

$$X_H = C_x \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_H^2 \cdot A_H, \quad (3.8)$$

— боковая сила:

$$Y_H = C_y \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_H^2 \cdot A_H, \quad (3.9)$$

— момент:

$$M_H = C_m \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_H^2 \cdot A_H \cdot L_H, \quad (3.10)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;

V_H – скорость движения ТТМ/водного потока, м/с;

A_H – площадь миделя натуре, м²;

L_H – длина (ширина) натуре в зависимости от положения обтекания, м.

3.3.2 Описание экспериментальной установки

Определение сил и моментов на корпусе ТТМ проводилось в аэродинамической трубе Университета речного и морского флота имени адмирала С. О. Макарова (регистрационный номер установки 588660).

Экспериментальные исследования проводились на аэродинамической трубе замкнутого цикла с открытой рабочей частью, представляющей собой специализированный испытательный стенд для моделирования гидродинамических процессов. Установка генерирует равномерный установившийся воздушный поток с заданными скоростными параметрами, обеспечивающий обтекание масштабной модели ТТМ, размещенной в рабочей зоне (рисунок 3.4). Принцип работы аэродинамической трубы закрытого цикла с

открытой рабочей частью заключается в создании управляемого воздушного потока, проходящего по замкнутому контуру, где основное испытательное воздействие происходит в открытой рабочей зоне. Воздух приводится в движение импеллером, размещенным в контуре трубы. Поток проходит через направляющие лопатки и конфузоры, где стабилизируется и ускоряется. В открытой рабочей части (наружу выведена испытательная зона) размещается модель объекта. Здесь воздух взаимодействует с объектом, и происходит измерение сил и моментов. После рабочей зоны воздух вновь втягивается в контур, проходит через диффузор, где снижается скорость, и направляется к вентилятору [172].

Рабочий участок аэродинамической трубы, используемой для проведения данного исследования, имеет рабочий диаметр 0,6 м. Воздушный поток в нем может разгоняться от 3 до 40 м/с [172].



а

б

Рисунок 3.4 – Общий вид гидродинамической установки-аэродинамической трубы (а) и ее рабочей зоны с монтажно-измерительным комплектом (б)

Экспериментальная установка включает нижний аэродинамический экран, моделирующий свободную поверхность водной преграды. Модель ТТМ закрепляется в перевернутом положении над плоскостью экрана с помощью специализированной державки, соединенной с четырехкомпонентным тензодинамометром (рисунок 3.5). Конструкция державки обеспечивает передачу на измерительные элементы динамометра усилий, возникающих при обтекании модели воздушным потоком.

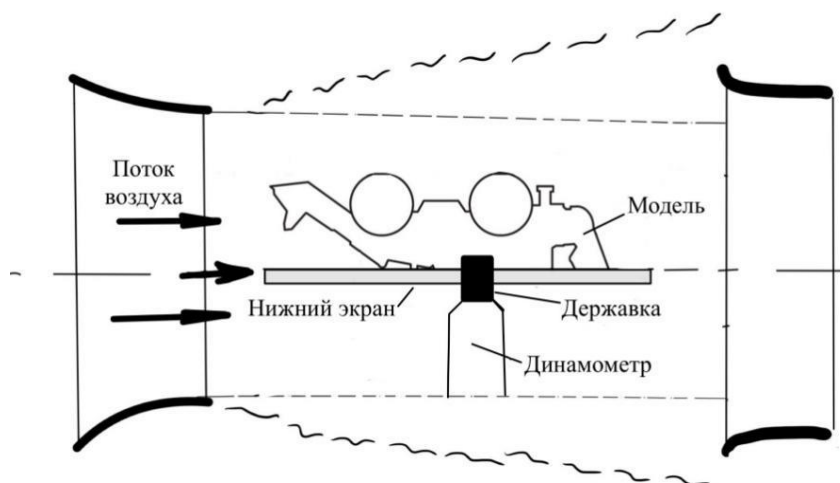


Рисунок 3.5 – Схема установки объекта в аэродинамической трубе

Измерительная система позволяет регистрировать две силовые компоненты (лобовую и боковую) и момент рыскания, действующие на модель в горизонтальной плоскости. Скорость воздушного потока контролируется с помощью трубки Пито-Прандтля, установленной вне зоны возмущений от модели [172]. Положение измерительного зонда обеспечивает регистрацию невозмущенных параметров потока, что гарантирует точность определения скоростных характеристик.

Установка позволяет изменять угол атаки потока α и угол обтекания (набегания потока) модели β в диапазоне от 0 до 360°, что необходимо для определения наихудшего варианта гидродинамической нагрузки. Установка модели на поворотном круге в рабочей зоне АДТ представлена на рисунке 3.6. Примеры подобных исследований на судах показывают, что максимальные значения составляющих сил возникают при углах набегания потока 0 и 90°, а максимальные значения гидродинамического момента – при набегания потока 45 и 135°. При этом увеличение момента может оказаться определяющим.

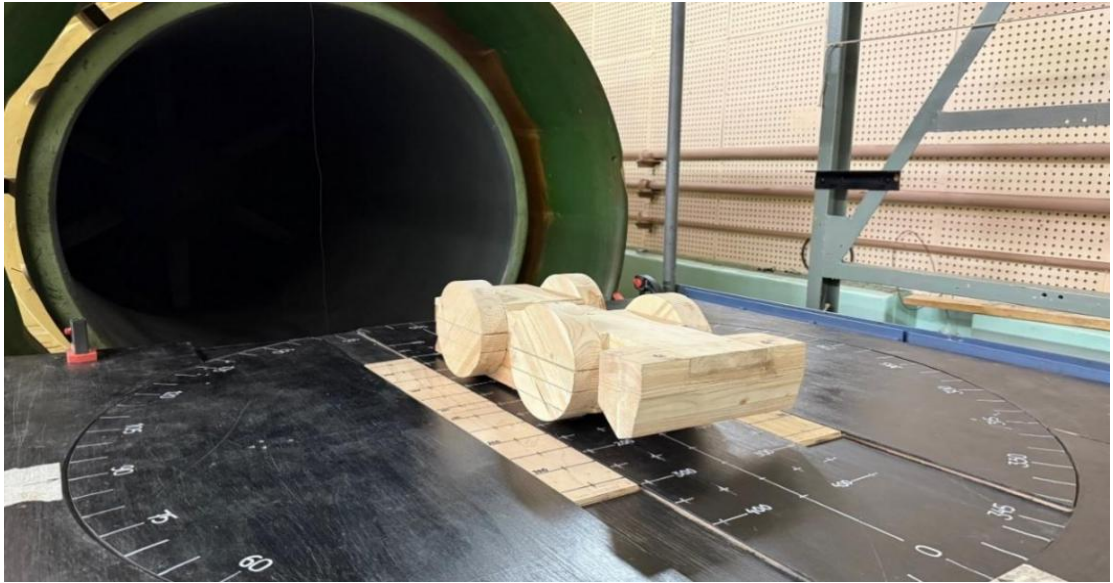


Рисунок 3.6 – Установка модели на поворотном круге в рабочей зоне АДТ

3.3.3 Описание модели

С учетом габаритных ограничений рабочей зоны аэродинамической трубы была разработана масштабная модель экскаватора-погрузчика в соотношении 1:10, изготовленная из дерева с возможностью послойного наращивания высоты для имитации различных степеней погружения. Геометрия корпуса модели была существенно упрощена для минимизации паразитных аэродинамических возмущений при проведении измерений. Предварительно в программном комплексе Компас-3D была создана трехмерная компьютерная модель с оптимизированной геометрией (рисунок 3.7), которая послужила основой для изготовления физического макета.

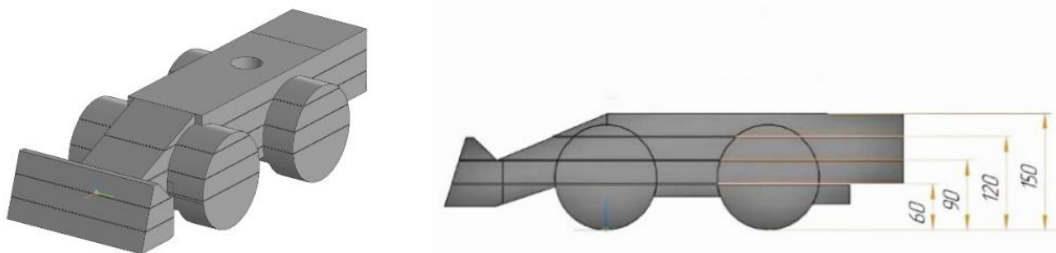


Рисунок 3.7 – Эскиз модели ТТМ упрощенной геометрии с послойным разделением и схема ее членения

Диаметр рабочей части аэродинамической трубы составляет 1 м, при этом диаметр рабочей равномерной струи составляет 0,6 м. В связи с этим для минимизации эффектов взаимодействия между моделью и стенками трубы и для обеспечения равномерного потока воздуха вокруг модели был обоснован рациональный размер ее длины, который составил 0,6 м. На основании этого были подобраны геометрические размеры модели исходя из масштаба 1:10.

Геометрические параметры натурального образца и его масштабной модели приведены в таблице 3.2 [173].

Таблица 3.2 – Геометрические размеры натурального образца и модели

Параметр	Значения для натурального образца	Значения для масштабной модели
Габаритная длина, L , м	5,91	0,59
Габаритная ширина, B , м	2,33	0,23
Высота по крыше кабины, H_n , м	3,03	0,30

Экспериментальная модель выполнена в виде четырех составных модулей (рисунок 3.8). Суммарная высота модели при последовательном наращивании слоев варьируется от 60 до 150 мм с строго выдержанным шагом 30 мм. Модель воспроизводит основные геометрические обводы корпуса и элементы ходовой части машины.



Рисунок 3.8 – Физическая модель экскаватора-погрузчика в масштабе 1:10

3.3.4 Критерии подобия

Для того чтобы результаты моделирования можно было с высокой степенью достоверности экстраполировать на реальные физические условия, требуется обеспечить соблюдение трех ключевых типов подобия: геометрического, кинематического и динамического.

Геометрическое подобие подразумевает сохранение геометрических пропорций между моделью и натурой, обеспечивающее соответствие их формы и размеров:

$$K_L = \frac{L_M}{L_H} = \frac{B_M}{B_H} = \frac{H_M}{H_H}, \quad (3.11)$$

где K_L – коэффициент геометрического подобия;

$L_{M,H}$ – длина модели и природы соответственно, м;

$B_{M,H}$ – ширина модели и природы соответственно, м;

$H_{M,H}$ – высота модели и природы соответственно, м.

Тогда коэффициент геометрического подобия K_L исходя из отношения (3.11) равен:

$$K_L = \frac{0,591}{5,91} = \frac{0,233}{2,33} = \frac{0,303}{3,03} = 0,1.$$

Динамическое подобие позволяет обеспечить эквивалентность сил, действующих на модель и природу, с учетом их массовых, инерционных и других динамических характеристик.

Для обеспечения полного динамического подобия необходимо выполнить равенство следующих критериев подобия для природы и модели [25, 174]:

— число Струхала:

$$St = \frac{T \cdot V}{L}, \quad (3.12)$$

— число Эйлера:

$$Eu = \frac{2p}{\rho \cdot V^2}, \quad (3.13)$$

— число Фруда:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}, \quad (3.14)$$

— число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu}, \quad (3.15)$$

— число Маха:

$$M = \frac{U}{a}, \quad (3.16)$$

где L – характерный геометрический размер, м;

T – время, с;

V – характерная скорость, м/с;

p – давление в жидкости, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

U – скорость газового потока, м/с;

μ – динамическая вязкость среды, Па·с;

a – скорость звука, м/с.

Число Струхалья St связано с неустановившимся или периодическим движением жидкости и учитывается при моделировании качки на воде. Число Эйлера Eu связано с силами гидродинамического давления и имеет самостоятельное значение только при моделировании процессов кавитации. Поскольку в моделируемом процессе движение считается установившимся (обтекание тела с постоянной скоростью) и не сопровождающимся кавитацией, то моделирование по критериям Струхалья и Эйлера не производится.

Число Маха характеризует сжимаемость потока. Поскольку исследуются дозвуковые течения ($M_a < 0,3$) поток можно считать несжимаемым, следовательно, данным критерием можно пренебречь.

Число Фруда характеризует отношение инерционных сил в среде к силе тяжести. Оно определяет моделирование процесса волнообразования при

движении объекта по поверхности воды. Равенство числа Фруда для натуре и модели обеспечивает пропорциональность волновых гидродинамических сил.

Для этого необходимо, чтобы:

$$\frac{V_M}{\sqrt{g \cdot L_M}} = \frac{V_H}{\sqrt{g \cdot L_H}}. \quad (3.17)$$

Тогда из пропорции (3.15) скорость модели составит:

$$V_M = V_H \cdot \sqrt{\frac{L_M}{L_H}} = V_H \cdot \sqrt{K_L}. \quad (3.18)$$

Исследуемые скорости движения натуре через водную преграду и скорости течения водного потока представлены соответственно в таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Исследуемые скорости движения на 1-й и 2-й передачах натурального образца

Параметр	Значение
Скорость движения натурального образца на 1-й передаче, V_1 , м/с	1,5
Скорость движения натурального образца на 2-й передаче, V_2 , м/с	3

Таблица 3.4 – Исследуемые скорости движения водного потока

Параметр	Значение
Скорость водного потока, $V_{вп1}$, м/с	0,5
Скорость водного потока, $V_{вп2}$, м/с	1
Скорость водного потока, $V_{вп3}$, м/с	1,5
Скорость водного потока, $V_{вп4}$, м/с	2
Скорость водного потока, $V_{вп5}$, м/с	2,5

Значения числа Фруда для всех исследуемых скоростей представлены на рисунке 3.9.

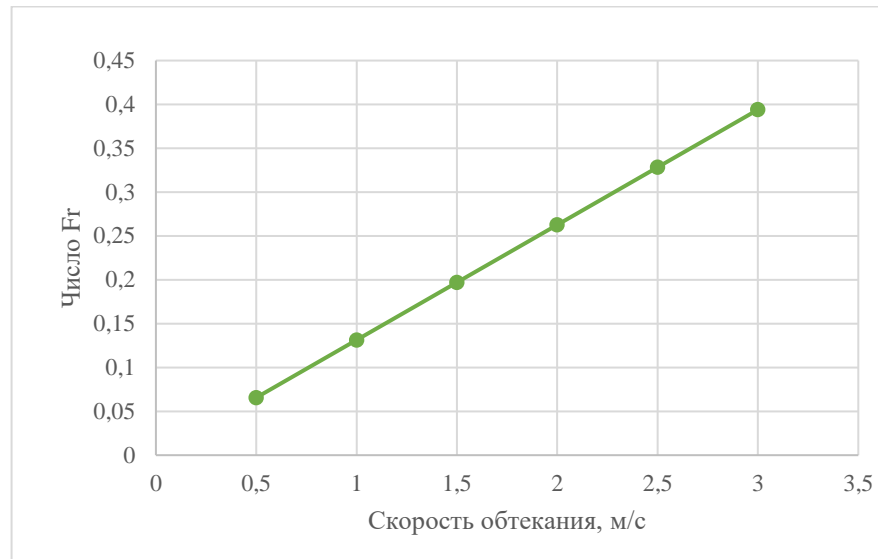


Рисунок 3.9 – Значения числа Фруда для модели в диапазоне скоростей от 0,5 до 3 м/с

Подставив исследуемые значения скоростей в формулу (3.16), получим значения скоростей обдувки для модели (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Скорости обдувки для модели по критерию Фруда

Параметр	Значение
Скорость движения природы на 1-й передаче, $V^1_{м}$, м/с	0,47
Скорость движения природы на 2-й передаче, $V^2_{м}$, м/с	0,94
Скорость водного потока, $V_{вп}^1_{м}$, м/с	0,158
Скорость водного потока, $V_{вп}^2_{м}$, м/с	0,316
Скорость водного потока, $V_{вп}^3_{м}$, м/с	0,474
Скорость водного потока, $V_{вп}^4_{м}$, м/с	0,632
Скорость водного потока, $V_{вп}^5_{м}$, м/с	0,79

Полученные значения скоростей обдувки для модели меньше 1 м/с. Диапазон скоростей воздушного потока в аэродинамической трубе составляет от 3 до 40 м/с. Таким образом, соблюсти критерий Фруда для исследуемых скоростей технически невозможно, однако при значении числа Fr меньше единицы, скорость и поток являются докритическими (спокойными). Полученные значения Fr менее 0,4, что позволяет принять допущение о незначительном волнообразовании и имитировать

при аэродинамических испытаниях свободную поверхность водной преграды путем установки специального экрана [172].

Учет критерия Рейнольдса Re в аэродинамическом эксперименте необходим для обеспечения динамической подобия между моделью и натурным объектом в условиях вязкостного взаимодействия потока с поверхностью тела.

Значения числа Рейнольдса для натурального образца для всех исследуемых скоростей, рассчитанные по зависимости (3.13) при принятой динамической вязкости воды $\mu=10^{-3}$, представлены на рисунке 3.10.

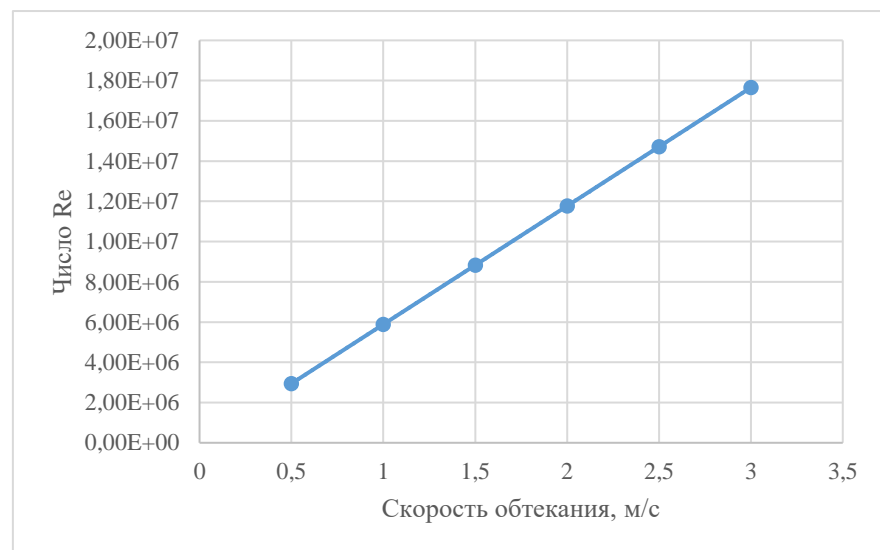


Рисунок 3.10 – Значения критерия Рейнольдса для натурального образца

При обтекании тел в свободном потоке переход от ламинарного режима к турбулентному может наступать при значениях $Re > 10^5$, в зависимости от геометрии, шероховатости поверхности и условий обдува. Полученные значения числа Рейнольдса ($Re > 10^6 \dots 10^7$) свидетельствуют о турбулентном режиме течения.

Таким образом, динамическое подобие моделируется на основе критерия Рейнольдса, где сходство процессов обеспечивается при соблюдении тождества его значений:

$$\frac{V_M L_M \rho_{\text{возд}}}{\mu_{\text{возд}}} = \frac{V_N L_N \rho_{\text{воды}}}{\mu_{\text{воды}}}. \quad (3.19)$$

Тогда из равенства (3.17) скорость обтекания модели составит:

$$V_M = \frac{V_H \cdot L_H \cdot \rho_{\text{ВОДЫ}} \cdot \mu_{\text{ВОЗД}}}{\rho_{\text{ВОЗД}} \cdot L_M \cdot \mu_{\text{ВОДЫ}}}. \quad (3.20)$$

При движении ТТМ через водную преграду со скоростью 1,5 м/с число Re составляет:

$$Re = \frac{1,5 \cdot 5,91 \cdot 998}{10^{-3}} \approx 8,8 \cdot 10^6.$$

Тогда из равенства (3.18) скорость обтекания модели воздухом составит:

$$V_M = \frac{1,5 \cdot 5,91 \cdot 998 \cdot 1,79 \cdot 10^{-5}}{0,591 \cdot 1,225 \cdot 10^{-3}} \approx 218 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скорость обтекания по данному условию подобия очень высокая, на такой скорости воздух становится сжимаемым ($M_a > 0,3$), что при исследовании будет искажать аэродинамику модели. Более того, такой скорости невозможно достичь в применяемой аэродинамической трубе. Таким образом, для модели в масштабе 1:10 при обтекании ее воздухом невозможно соблюсти подобие по числу Рейнольдса.

Однако для модели ТТМ, имеющей плохообтекаемую форму, скорость потока попадает в зону автомодельности, и полученные результаты измерений будут корректными. Поэтому необходимо определить скорость обдува модели так, чтобы обеспечивалось $Re > 10^6$. С учетом технических возможностей аэродинамической трубы и задач эксперимента скорость обтекания модели выбрана 24 м/с. Несмотря на частичное нарушение подобия чисел Рейнольдса ($Re_M \approx 1,1 \cdot 10^6$, $Re_H \approx 8,8 \cdot 10^6$), оба режима соответствуют турбулентному течению, где аэродинамические коэффициенты демонстрируют слабую зависимость от числа Re .

3.3.5 Планирование полнофакторного эксперимента

В данном исследовании производится полный факторный эксперимент. План полнофакторного эксперимента включает в себя все возможные комбинации уровней факторов. Количество точек эксперимента рассчитывается как произведение числа уровней каждого фактора.

Число варьируемых факторов $k = 2$. Наименование, кодирование и значения факторов представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Наименование, кодирование и значения варьируемых факторов экспериментального исследования

№ п/п	Наименование управляемого параметра	Обозначение	Кодирование	Значения
1.	Глубина водной преграды, м	$h_{бр}$	X_1	0,06 0,09 0,12 0,15
2.	Угол обтекания (набегания потока), град	β	X_2	0° 30° 60° 90° 120° 150° 180°

Количество уровней для угла набегания потока (β): 7 уровней.

Количество уровней водной преграды ($h_{бр}$): 4 уровня.

Общее количество точек эксперимента: $7 \times 4 = 28$.

Интервалы варьирования представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Интервалы варьирования параметров

№ п/п	Наименование управляемого параметра	Обозначение	Кодирование	Интервал варьирования, I_i
1.	Глубина водной преграды, м	$h_{бр}$	X_1	0,3
2.	Угол обтекания (набегания потока), град	β	X_2	30°

Матрица полного факторного эксперимента для двух факторов приведена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Матрица полнофакторного эксперимента

№ опыта	Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	Угол набегания потока, β , град	Скорость обдува, V , м/с	Измеряемые параметры
1	0,06	0°	24	X, Y, M_z
2	0,06	30°	24	X, Y, M_z
3	0,06	60°	24	X, Y, M_z
...	24	X, Y, M_z
28	0, 15	180°	24	X, Y, M_z

Для обработки результатов применена полиномиальная регрессионная модель 2-го порядка:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (3.21)$$

$$Y_1, Y_2, Y_3 = f(X_1, X_2), \quad (3.22)$$

где Y_1 – коэффициент лобовой составляющей силы сопротивления (C_x);

Y_2 – коэффициент боковой составляющей силы сопротивления (C_y);

Y_3 – коэффициент момента (C_{mz}).

Количество повторений эксперимента m выбрано таким образом, чтобы обеспечить доверительную вероятность проводимых испытаний 90%.

Для определения доверительной вероятности использована формула Корнфельда:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^m, \quad (3.23)$$

где α – доверительная вероятность, m – число параллельных опытов.

Исходя из этого, для обеспечения доверительной вероятности 90% число параллельных опытов m должно быть не менее 4-х.

3.4 Обработка результатов эксперимента по определению коэффициентов гидродинамического сопротивления

3.4.1 Статистическая обработка результатов эксперимента

Были рассчитаны коэффициенты Пирсона (r) и Спирмена (ρ) для оценки линейной и монотонной связи между углом набегания потока и коэффициентов лобового и бокового сопротивления, а также коэффициентом момента рысканья (таблицы 3.9 – 3.11).

Таблица 3.9 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x от угла набегания потока для каждой глубины

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	Пирсон (r)	Спирмен (ρ)	Интерпретация
0,6	– 0,92	– 0,93	Сильная отрицательная связь
0,9	– 0,87	– 0,89	Сильная отрицательная связь
1,2	– 0,65	– 0,71	Умеренная отрицательная связь
1,5	– 0,79	– 0,82	Сильная отрицательная связь

Коэффициент лобового сопротивления C_x уменьшается с ростом угла для всех глубин. Наибольшая корреляция при $h = 0,6$ ($r = -0,92$), наименьшая — при $h = 1,2$ ($r = -0,65$). Разница между r и ρ (Спирмен выше) указывает на нелинейность.

Таблица 3.10 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x от глубины водной преграды для каждого угла набегания потока

Угол набегания потока, β	Пирсон (r)	Спирмен (p)	Интерпретация
0°	0,98	1,0	Сильная положительная связь
30°	0,86	0,93	Сильная положительная связь
60°	0,45	0,50	Умеренная положительная связь
90°	– 0,15	– 0,21	Слабая отрицательная связь
120°	– 0,76	– 0,79	Сильная отрицательная связь
150°	– 0,88	– 0,93	Сильная отрицательная связь
180°	– 0,25	– 0,36	Слабая отрицательная связь

При углах 0–60° коэффициент лобового сопротивления C_x растет с глубиной ($r = 0.45 - 0.98$). При углах 120–150° коэффициент лобового сопротивления C_x падает с глубиной ($r = -0.76 - 0.88$). При углах 90° и 180° связь слабая/незначимая.

Таблица 3.11 – Матрица корреляций для всех параметров

Параметры	Угол набегания потока, $\beta, ^\circ$	Глубина, $h_{бр}, м$	Коэффициент лобового сопротивления, C_x
Угол набегания потока, $\beta, ^\circ$	1,0	0,02	– 0,84
Глубина, $h_{бр}, м$	0,02	1,0	0,15
Коэффициент лобового сопротивления, C_x	– 0,84	0,15	1,0

Сильнее всего коэффициент лобового сопротивления C_x связан с углом ($r = -0.84$). Глубина слабо влияет на коэффициент лобового сопротивления C_x в общем случае, но ее роль усиливается при конкретных углах.

В таблице 3.12 представлен дисперсионный анализ для оценки значимости факторов.

Таблица 3.12 – Дисперсионный анализ для оценки значимости факторов

Параметр	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F – значение	p – value
Угол набегания потока, β	4,217	6	0,703	185,2	<0,001
Глубина водной преграды, $h_{бр}$	1,892	3	0,631	166,1	<0,001
Взаимодействие (угол и глубина)	0,984	18	0,055	14,4	<0,001
Квадратичные члены	0,327	2	0,163	43,0	<0,001
Остаток	0,045	–	–	–	–
Итого	7,465	27	–	–	–

Угол ($p < 0,001$) и глубина ($p < 0,001$) сильно значимы. Взаимодействие ($p < 0,001$) и квадратичные члены ($p < 0,001$) также значимы. Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2-го порядка представлена в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2-го порядка

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t – статистика	p – value
b_0	0,112	0,015	7,47	< 0,001
b_1	0,623	0,032	19,5	< 0,001
b_2	– 0,0045	0,0002	– 22,5	< 0,001
b_{11}	– 0,215	0,012	– 17,9	< 0,001
b_{22}	– 0,00001	0,000001	– 10,0	< 0,001
b_{12}	– 0,001	0,0001	– 10,0	< 0,001

Тогда уравнение регрессии 2-го порядка для коэффициента лобового сопротивления:

$$C_x = 0,112 + 0,623 \cdot x_1 - 0,0045 \cdot x_2 - 0,215 \cdot x_1^2 - 0,00001 \cdot x_2^2 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.24)$$

Проверка адекватности модели: коэффициент детерминации: $r^2 = 0,993$ – модель объясняет 99,3% дисперсии.

Статистический анализ для коэффициента бокового сопротивления и коэффициента момента рысканья представлен в Приложении Б.

Уравнение регрессии 2-го порядка для коэффициента бокового сопротивления:

$$C_y = -0,152 + 1,876 \cdot x_1 + 0,023 \cdot x_2 - 0,642 \cdot x_1^2 - 0,0002 \cdot x_2^2 + 0,005 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.25)$$

Коэффициент детерминации: $r^2 = 0,996$ – модель объясняет 99,6% дисперсии.

Уравнение регрессии 2-го порядка для коэффициента момента рысканья:

$$C_{mz} = -0,85 + 3,45 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 1,12 \cdot x_1^2 - 0,002 \cdot x_2^2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.26)$$

Коэффициент детерминации: $r^2 = 0,988$ – модель объясняет 98,8% дисперсии.

3.4.2 Результаты определения коэффициентов лобового и бокового гидродинамического сопротивления

Значения параметров, полученные в ходе эксперимента, представлены в Приложении В.

На начальном этапе обработки результатов аэродинамического эксперимента после приведения значений к связанной системе координат по зависимостям (3.3) и (3.4) определялись коэффициенты аэродинамического сопротивления (C_x) при двух характерных положениях модели относительно направления набегающего потока воздуха:

— при угле набегающего потока 0° — когда продольная ось модели была ориентирована параллельно потоку: в этом положении определялось

сопротивление, возникающее при минимальной лобовой проекции, что соответствует наиболее "обтекаемому" положению модели;

— при угле набегающего потока 90° — когда продольная ось модели была перпендикулярна потоку: это положение характеризуется наибольшей лобовой площадью и, соответственно, максимальным сопротивлением.

Значения коэффициентов лобового и бокового сопротивления для каждого слоя модели представлены в таблицах 3.14 – 3.15.

Таблица 3.14 – Значения коэффициентов лобового сопротивления для каждого слоя модели

Высота модели h_i , мм	Угол набегающего потока, $\beta = 0^\circ$	
	Лобовая составляющая силы сопротивления, X, Н	Коэффициент сопротивления, C_x
60	49,79	0,33
90	69,03	0,47
120	98,63	0,68
150	127,66	0,91

Таблица 3.15 – Значения коэффициентов бокового сопротивления для каждого слоя модели

Высота модели, h_i , мм	Угол набегающего потока, $\beta = 90^\circ$	
	Лобовая составляющая силы сопротивления, X, Н	Коэффициент сопротивления, C_y
60	113,15	0,43
90	196,18	0,76
120	262,23	1,04
150	328,46	1,35

3.4.3 Сравнение результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными

В целях оценки достоверности результатов имитационного моделирования были проведены сопоставления с экспериментальными данными, полученными для различных глубин водной преграды. В таблице 3.16 представлены значения коэффициента лобового сопротивления C_x , полученные в эксперименте и имитационным моделированием с абсолютными и относительными (в %) отклонениями.

Таблица 3.16 – Сравнение значений коэффициента лобового сопротивления C_x , полученных экспериментально и путем имитационного моделирования

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	$C_x^{расч}$	$C_x^{эксп}$	Абсолютное отклонение, Δ	Относительное отклонение, δ (%)
0,6	0,35	0,33	0,02	5,20
0,9	0,52	0,47	0,05	10,76
1,2	0,64	0,68	0,04	5,95
1,5	0,86	0,91	0,05	4,96

Сравнение коэффициентов лобового сопротивления, полученных численным моделированием и экспериментально, показывает достаточное соответствие результатов. Для всех рассмотренных глубин водного потока расхождения не превышают 5 – 11%. Совпадение тенденций изменения коэффициента с увеличением глубины подтверждает достоверность численного подхода и его применимость для моделирования сопротивления в потоке.

В таблице 3.17 представлены значения коэффициента сопротивления C_y , полученные в эксперименте и имитационным моделированием с абсолютными и относительными (в %) отклонениями.

Таблица 3.17 – Сравнение значений коэффициента бокового сопротивления C_y , полученные экспериментально и путем имитационного моделирования

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	$C_y^{расч}$	$C_y^{эксп}$	Абсолютное отклонение, Δ	Относительное отклонение, δ (%)
0,6	0,42	0,43	0,01	1,59
0,9	0,74	0,76	0,02	2,00
1,2	1,01	1,04	0,03	2,58
1,5	1,32	1,35	0,03	2,24

Результаты численного моделирования и экспериментальных измерений коэффициента бокового сопротивления демонстрируют высокую степень согласованности. Абсолютные и относительные отклонения во всех случаях минимальны, не превышают 2,6%. Это свидетельствует о том, что численная модель хорошо описывает физику процесса и адекватно отражает влияние глубины на боковое сопротивление. Такое совпадение подтверждает надежность использованного подхода численного моделирования.

3.4.4 Оценка изменения коэффициентов аэродинамического сопротивления транспортно-технологической машины при изменении угла набегания потока

Значения сил гидродинамического сопротивления ТТМ при изменении угла набегания потока β важно знать для оценки бродоходимости машин при маневрировании на затопленной местности. В процессе модельных испытаний определялись коэффициенты аэродинамического сопротивления модели с последующим расчетом значения сил гидродинамического сопротивления натурального образца. Изменение углов набегания потока в ходе эксперимента соответствовало данным таблицы 3.7 по углу β . Результаты обработки данных эксперимента представлены в графическом виде, как зависимости трех ключевых параметра (C_x , C_y , C_{mz}), оказывающих влияние на величину сил аэродинамического

сопротивления модели в потоке, от угла набегания потока. Графики построены для четырех уровней водной преграды в соответствии с таблицей 3.7 и представлены на рисунках 3.11 – 3.14.

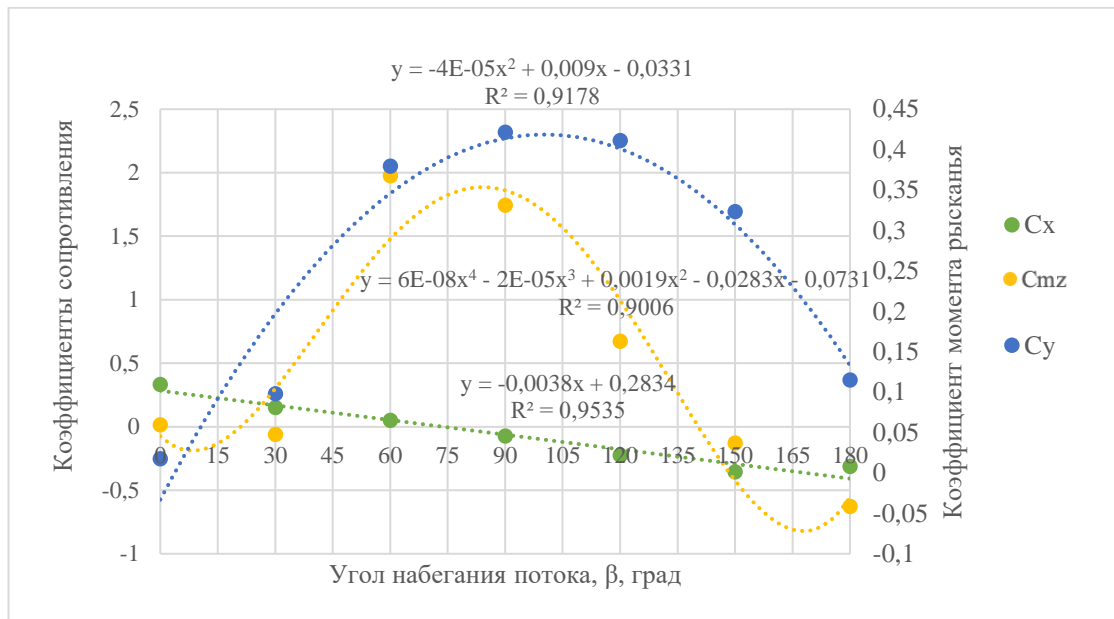


Рисунок 3.11 – Зависимость лобового, бокового коэффициентов сопротивления и коэффициента момента рысканья от угла набегавшего потока для глубины водного потока 0,6 м

При малых углах ($0 - 30^\circ$) преобладает лобовое сопротивление C_x , с незначительным боковым C_y . При увеличении угла до 90° возрастает боковая сила и момент, что может вызвать потерю устойчивости (рыскание). Для всех других глубин погружения машины качественная картина изменения C_x и C_y сохраняется. Значения C_{mz} достигают максимальных значений вблизи 45° .

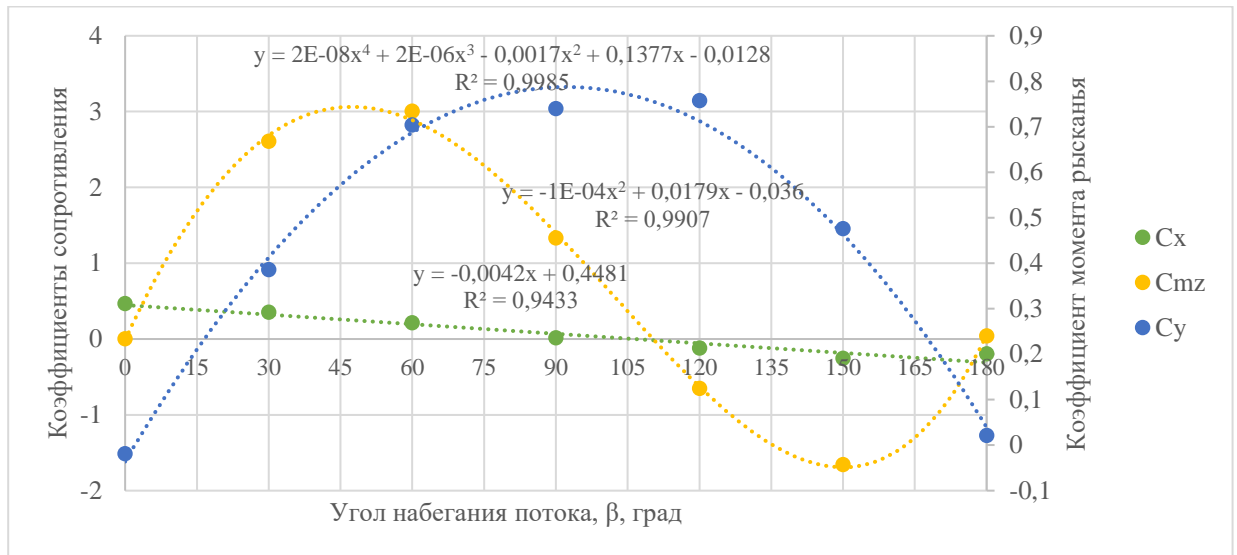


Рисунок 3.12 – Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рысканья от угла набегающего потока для глубины водного потока 0,9 м

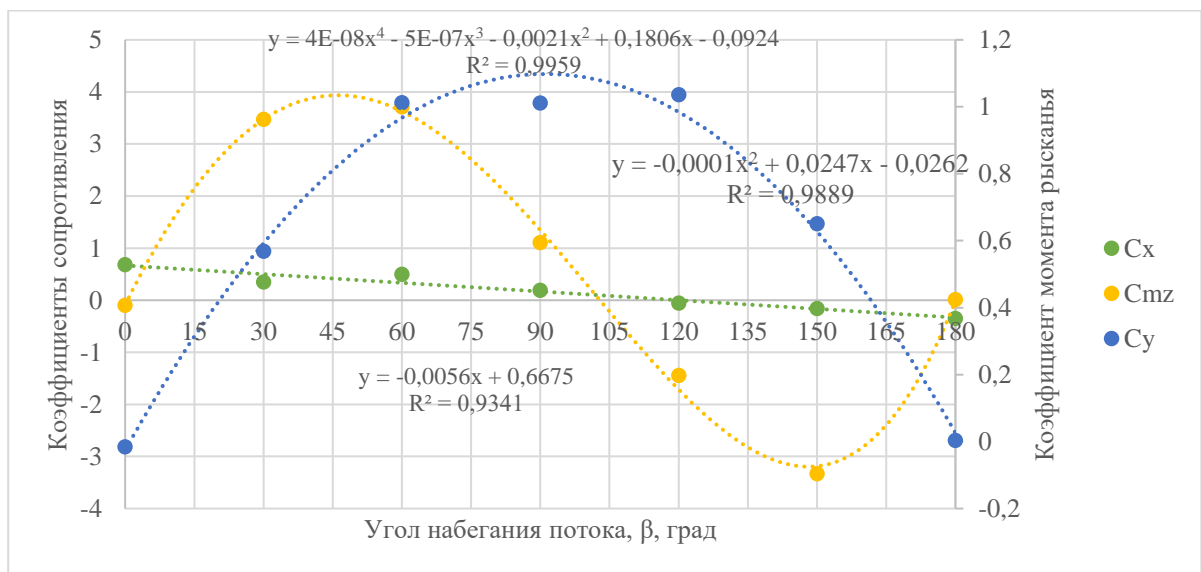


Рисунок 3.13 – Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рысканья от угла набегающего потока для глубины водного потока 1,2 м

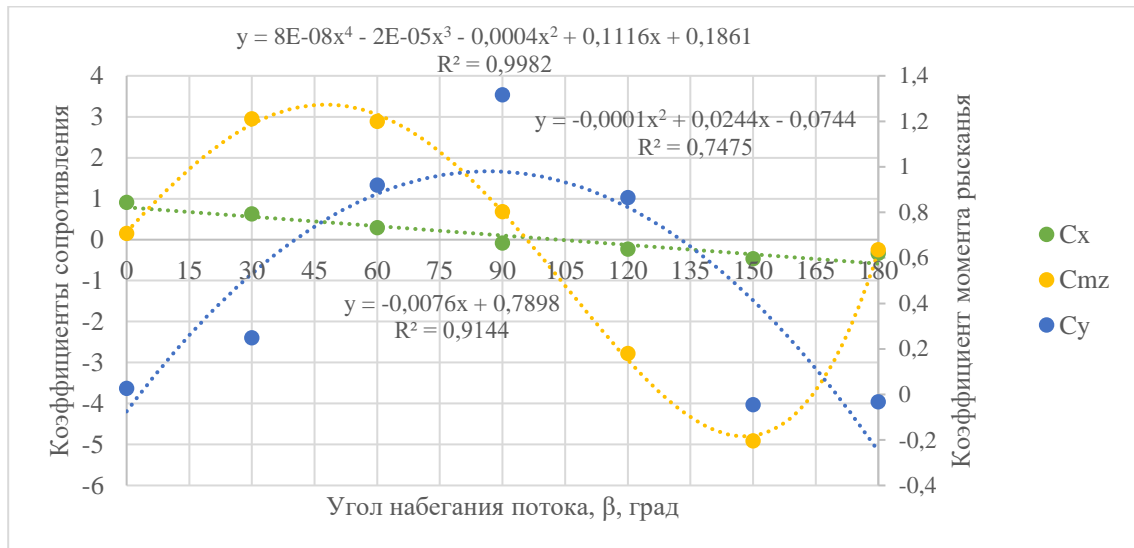


Рисунок 3.14 – Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рысканья от угла набегающего потока для глубины водного потока 1,5 м

Полученные зависимости демонстрируют ярко выраженную чувствительность гидродинамических коэффициентов к углу набегающего потока. Значительная величина коэффициента бокового сопротивления C_y и максимальные значения коэффициента момента рысканья C_{mz} вблизи 45° могут приводить к снижению курсовой устойчивости модели, особенно в условиях бокового потока.

3.4.5 Определение сил лобового и бокового сопротивления для натурального образца транспортно-технологической машины

Для перехода от модельных коэффициентов к реальным значениям гидродинамических сил и момента рысканья на натурном образце была использована классическая методика геометрического подобия.

По зависимостям (3.8 – 3.9) были определены значения сил сопротивления для натурального образца при лобовом и боковом обтекании, которые представлены на рисунках 3.15 – 3.16.

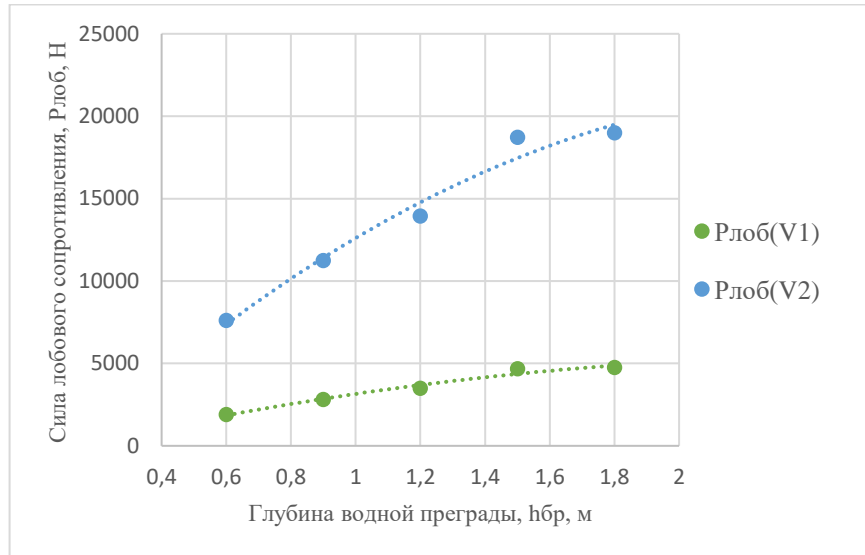


Рисунок 3.15 – Зависимость лобовой силы сопротивления от глубины водного потока

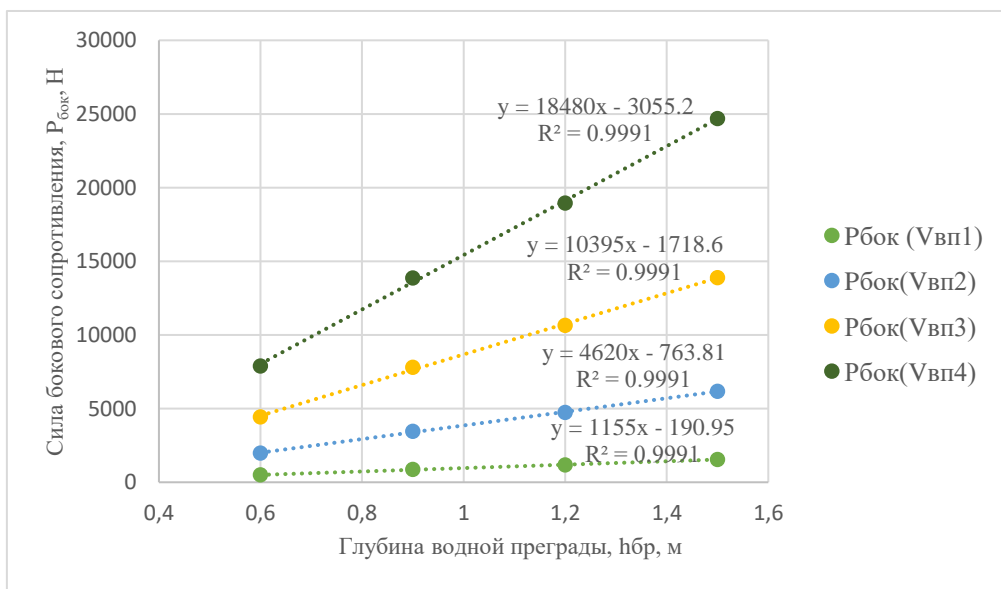


Рисунок 3.16 – Зависимость боковой силы сопротивления от глубины водного потока

Выводы по главе 3

1. Экспериментальная оценка гидростатических и гидродинамических характеристик ТТМ была проведена на ее масштабных моделях и включала определение объемного водоизмещения методом погружения и косвенное определение коэффициентов гидродинамического сопротивления и момента

рысканья на основе прямых измерений сил аэродинамического давления и момента рысканья в АДТ.

2. Объемное водоизмещение модели, определенное по методике гидростатического уравнивания, позволяет установить фактический геометрический объем подводной части машины, необходимый для дальнейших пересчетов в натурные условия. Сравнение показало, что 3D-модель корректно отражает геометрию ТТМ: расхождение с экспериментальными данными составило менее 12%.

3. При экспериментальных исследованиях в аэродинамической трубе получены значения коэффициентов лобового C_x , бокового C_y гидродинамического сопротивления и момента рысканья C_{mz} в широком диапазоне углов атаки (от 0° до 180°) на нескольких характерных глубинах погружения для экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX.

4. Установлена удовлетворительная сходимость результатов расчетного и экспериментального определения коэффициентов лобового и бокового гидродинамических сопротивлений машины, что подтверждает адекватность разработанного метода имитационного моделирования взаимодействия машины со средой обтекания.

Установлено, что:

— коэффициент лобового сопротивления C_x демонстрирует линейное снижение с ростом угла набегания потока вплоть до 90° , затем – симметричное возрастание;

— коэффициенты бокового сопротивления C_y и момента рысканья C_{mz} проявляют четко выраженную нелинейную зависимость, достигая экстремальных значений при углах набегания потока около 45° ;

— глубина погружения оказывает заметное влияние на величину C_{mz} , что указывает на существенную роль гидродинамической асимметрии и градиента давления при различных условиях обтекания.

5. На основании полученных экспериментальных данных предложены регрессионные зависимости для расчета коэффициентов гидродинамического

сопротивления и рыскающего момента для экскаватора-погрузчика JSB 4CX в условиях различных глубин погружения и углов набегания потока. Полученные коэффициенты могут использоваться для построения натурной модели движения, уточнения расчетных методов и верификации численного моделирования.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили получить обоснованные количественные характеристики, необходимые для оценки тяговых свойств, маневренности и устойчивости ТТМ при движении в водной среде.

ГЛАВА 4. МЕТОД РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ БРОДОХОДИМОСТИ ОБРАЗЦОВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

4.1 Алгоритм метода расчетной оценки бродоходимости транспортно-технологических машин

Для обоснованного инженерного анализа бродоходимости ТТМ, включая экскаваторы-погрузчики, предлагается алгоритм метода расчетной оценки, основанный на поэтапном определении ключевых гидростатических, гидродинамических и силовых параметров, влияющих на возможность безопасного преодоления водных преград.

Разработанный алгоритм, представленный на рисунке 4.1 в виде блок-схемы, обеспечивает системный подход к оценке бродоходимости и может быть использован при проектировании, модернизации и верификации ТТМ, предназначенных для эксплуатации в сложных дорожных условиях с преодолением водных преград.

Разработанный алгоритм был реализован в виде программы для электронно-вычислительных машин (далее – ЭВМ) [175]. Свидетельство о ее государственной регистрации приведено в Приложении Г.

Разработанный метод может быть применен при производстве автотехнических экспертиз для анализа опрокидывания ТТМ, работающих в зонах затопления. Методика позволяет оценить влияние гидрологических параметров потока, характеристик грунта и конструктивных особенностей ТС на потерю устойчивости. Это обеспечивает объективную основу для установления причинно-следственных связей при расследовании инцидентов, оценки действий оператора и технического состояния машины в условиях обводненной местности [176, 177].

Представленный метод был успешно применен в работе ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» для разработки и обоснования требований к проходимости транспортных средств при преодолении водных преград вброд. Также результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)», которые были включены в дисциплины «Автотракторный транспорт» и «Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных дорожных средств и оборудования» для подготовки студентов по направлениям 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» со специализацией «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 15.04.03 «Прикладная механика».

Акты внедрения, подтверждающие практическое применение метода, представлены в Приложении Д.

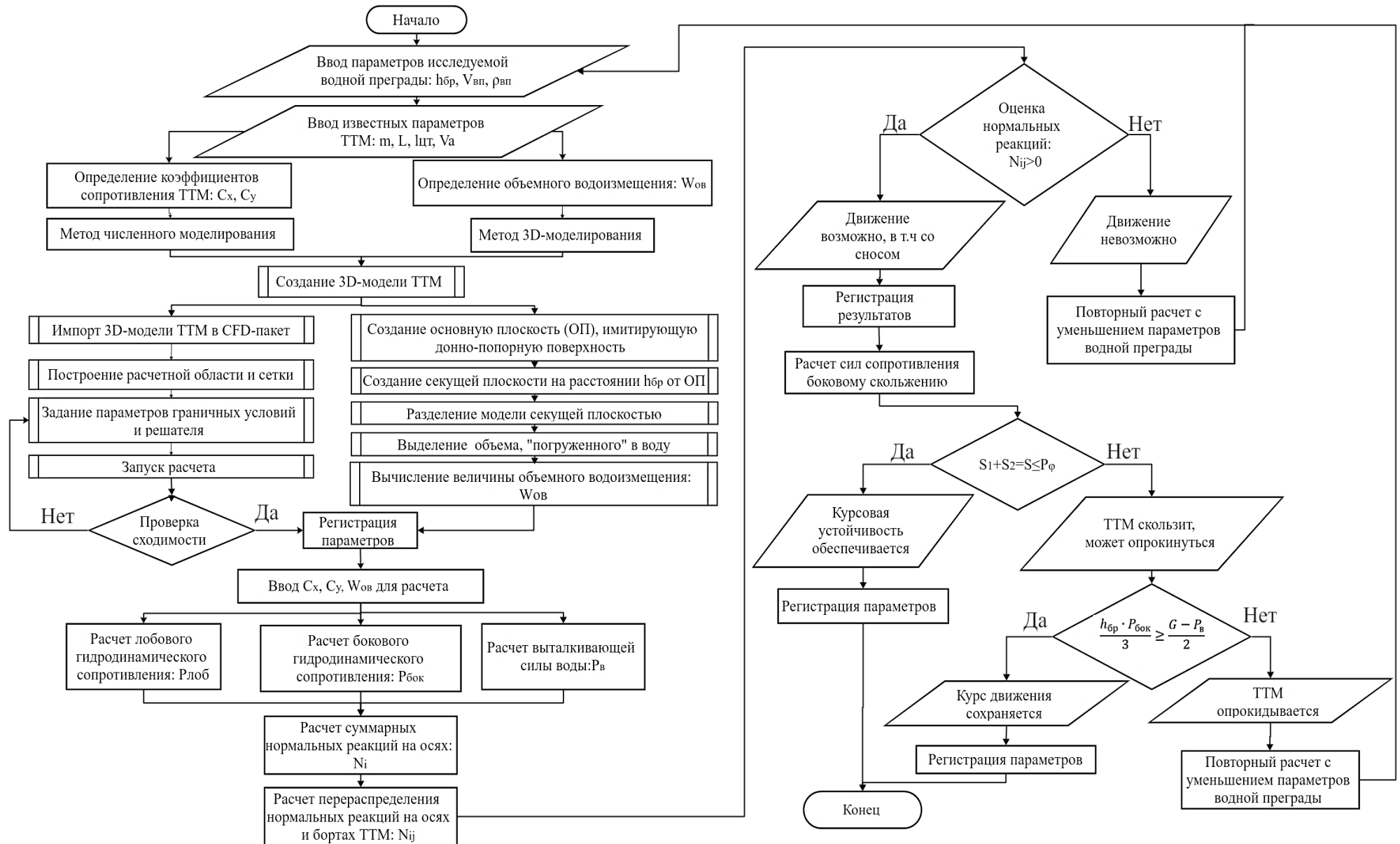


Рисунок 4.1 – Блок-схема применения метода расчетной оценки бродоходности транспортно-технологических машин

4.2 Пример реализации разработанного расчетного метода при оценке бродоходимости экскаватора-погрузчика JCB 4CX

В качестве исходных данных для расчета использованы значения необходимых параметров, полученные по результатам имитационного моделирования в рамках разработки главы 2 и экспериментальных исследований в рамках главы 3.

4.2.1 Определение выталкивающей силы воды

Значения выталкивающей силы воды P_v для контрольных параметров глубины затопления при значениях объемного водоизмещения, полученных методом 3D-моделирования, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения выталкивающей силы воды для контрольных параметров глубины затопления

Глубина водной преграды, $h_{бр}$, м	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
Выталкивающая сила воды, P_v , Н	28245,2	58967,5	84902,2	102016	111522

Проверка условия всплытия машины: $G > P_v$. Вес машины составляет:

$$G = 9,81 \cdot m = 9,8 \cdot 8660 = 84\,955 \text{ Н.}$$

Зависимость выталкивающей силы от глубины водной преграды и вес машины представлены на рисунке 4.2.

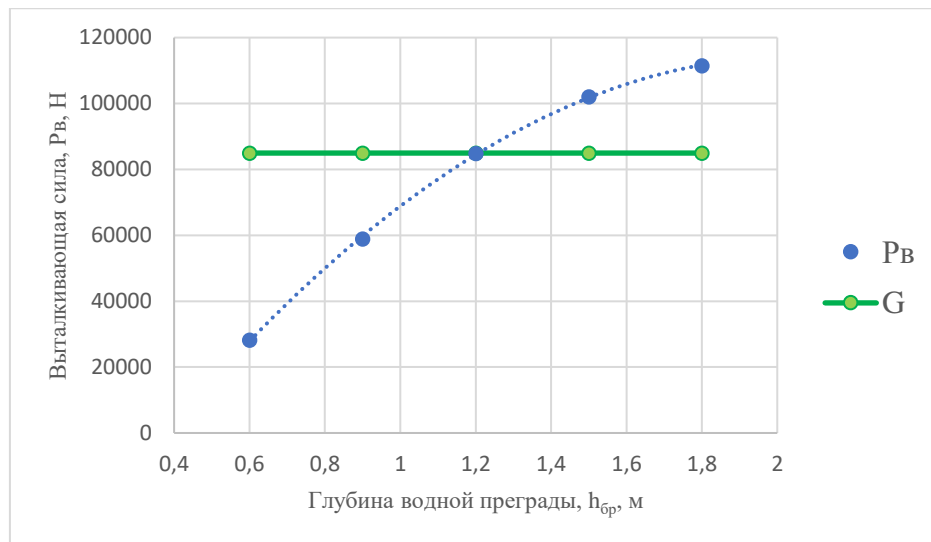


Рисунок 4.2 – Зависимость выталкивающей силы от глубины водной преграды машины

Из рисунка 4.2 видно, что всплытие ТТМ произойдет на глубине 1,2 м.

4.2.2 Определение сил лобового сопротивления при прямолинейном движении транспортно-технологической машины в стоячей воде

Коэффициенты сопротивления C_x и C_y были приняты на основании результатов численного моделирования и дополнительно подтверждены данными аэродинамического эксперимента, что обеспечивает их достоверность и применимость для рассматриваемых условий.

Площадь характерной лобовой проекции погруженной в воду части ТТМ определялась на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе КОМПАС 3D и составляет 4,838 м².

Контрольными параметрами скорости движения транспортного средства через водную преграду являются значения скоростей на 1-й и 2-й передачах – 1,5 м/с и 3 м/с соответственно. Сила лобового гидродинамического сопротивления рассчитана для пяти контрольных параметров уровня водной преграды (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Сила лобового гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня брода

	Лобовое сопротивление, $R_{\text{лоб}}$, Н				
	При движении на 1-й передаче, $V_1=1,5$ м/с	1901,15	2810,98	3487,25	4679,55
При движении на 2-й передаче, $V_2=3$ м/с	7604,61	11243,95	13949,02	18718,20	18989,79

Зависимость лобового гидродинамического сопротивления от уровня затопления машины, а также значения лобового гидродинамического сопротивления, полученные с помощью экспериментальных данных, представлены на рисунке 4.3 [161].

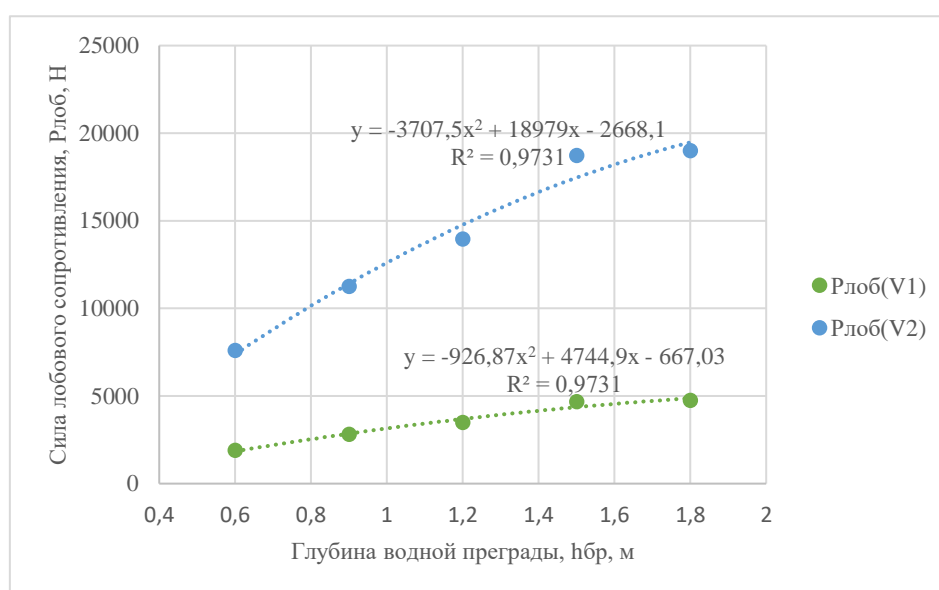


Рисунок 4.3 – Зависимость лобового гидродинамического сопротивления от глубины водной преграды

Расчеты лобового сопротивления гидродинамической среды в настоящем исследовании выполнялись без учета кажущейся скорости – результирующего вектора, образованного движением объекта и поперечным течением. Такой подход обоснован тем, что предварительный анализ показал: при характерных условиях преодоления водной преграды (низкая скорость движения и незначительное боковое течение) величина отклонения результирующего лобового сопротивления

при использовании кажущейся скорости не превышает 5% по сравнению с расчетами, основанными на прямолинейной скорости объекта.

С учетом инженерной допустимости отклонений в пределах $\pm 5\%$ и стремления к упрощению расчетной модели без существенной потери точности, влияние поперечного течения на изменение направления движения машины было проигнорировано как малозначимое в рамках поставленной задачи.

Нормальные реакции, определенные по зависимостям (2.5) – (2.8), представлены на рисунке 4.4.

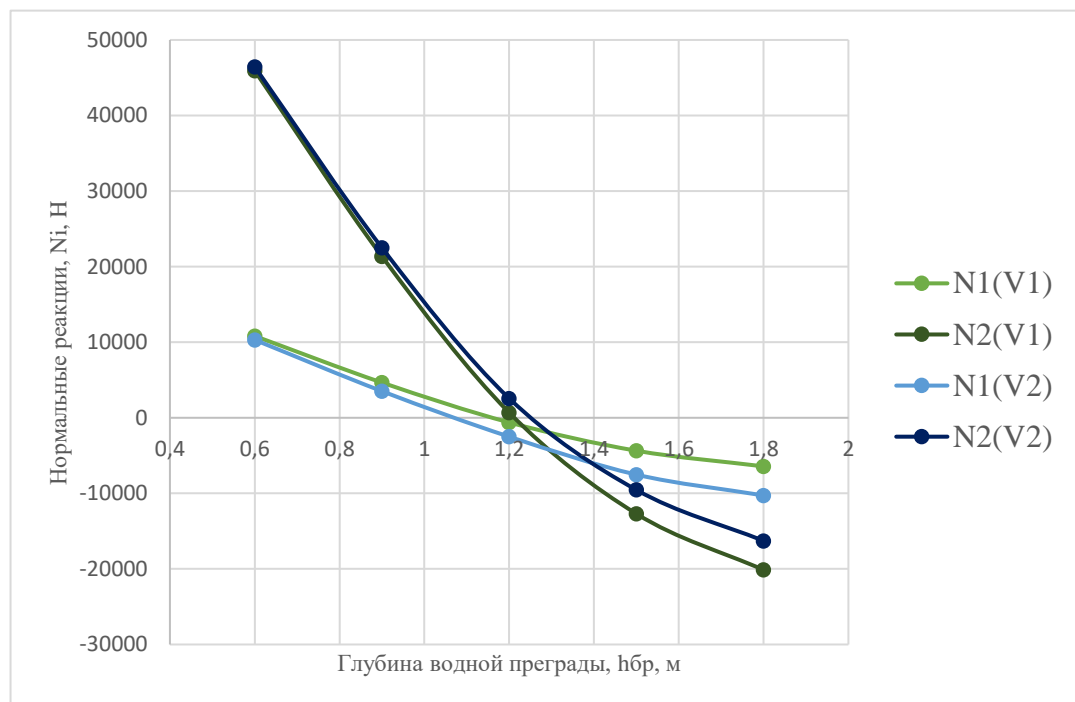


Рисунок 4.4 – Зависимость нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика от глубины брода

Воздействие лобового гидродинамического сопротивления на движение экскаватора-погрузчика в условиях стоячей воды вызывает существенное перераспределение нормальных реакций по осям машины: наблюдается разгрузка передней оси с одновременной нагрузкой задней оси. Согласно данным, представленным на графике рисунка 4.4, при достижении глубины водного потока свыше 1 м нормальные реакции на колесах передней оси приобретают отрицательные значения. Данное явление свидетельствует о том, что под совокупным действием выталкивающей силы и лобового гидродинамического

сопротивления управляемая ось машины утрачивает сцепление с донной опорной поверхностью [161]. Начинается этот процесс при движении на 1-й и 2-й передачах на глубине 1,2 м и 1,075 м соответственно, что приводит к потере управляемости экскаватора-погрузчика даже в стоячей воде.

4.2.3 Определение боковой силы сопротивления при неподвижной транспортно-технологической машине, обтекаемой водной преградой сбоку с постоянной скоростью

Площадь боковой проекции погруженной в воду части ТТМ определялось на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе КОМПАС 3D и составила – 9,39 м².

Коэффициенты сопротивления C_x и C_y были приняты на основании результатов численного моделирования и дополнительно подтверждены данными аэродинамического эксперимента, что обеспечивает их достоверность и применимость для рассматриваемых условий.

В соответствии с контрольными параметрами скорости потока была рассчитана сила бокового гидродинамического сопротивления для 5 контрольных параметров уровня брода (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды

	Сила бокового сопротивления, Р _{бок} , Н				
	При скорости водного потока $V_{вп1} = 0,5$ м/с	439,62	941,80	1570,85	1585,25
При скорости водного потока $V_{вп2} = 1$ м/с	1758,50	3767,23	6283,40	6341,03	7832,93
При скорости водного потока $V_{вп3} = 1,5$ м/с	3956,64	8476,26	14137,65	14267,33	17624,10

При скорости водного потока $V_{вп4} = 2 \text{ м/с}$	7034,03	15068,92	25133,61	25364,14	31331,73
При скорости водного потока $V_{вп5} = 2,5 \text{ м/с}$	10990,68	23545,19	39271,26	39631,47	48955,83

Зависимость бокового гидродинамического сопротивления от уровня затопления машины, а также значения бокового гидродинамического сопротивления, полученные с помощью экспериментальных данных, представлены на рисунке 4.5.

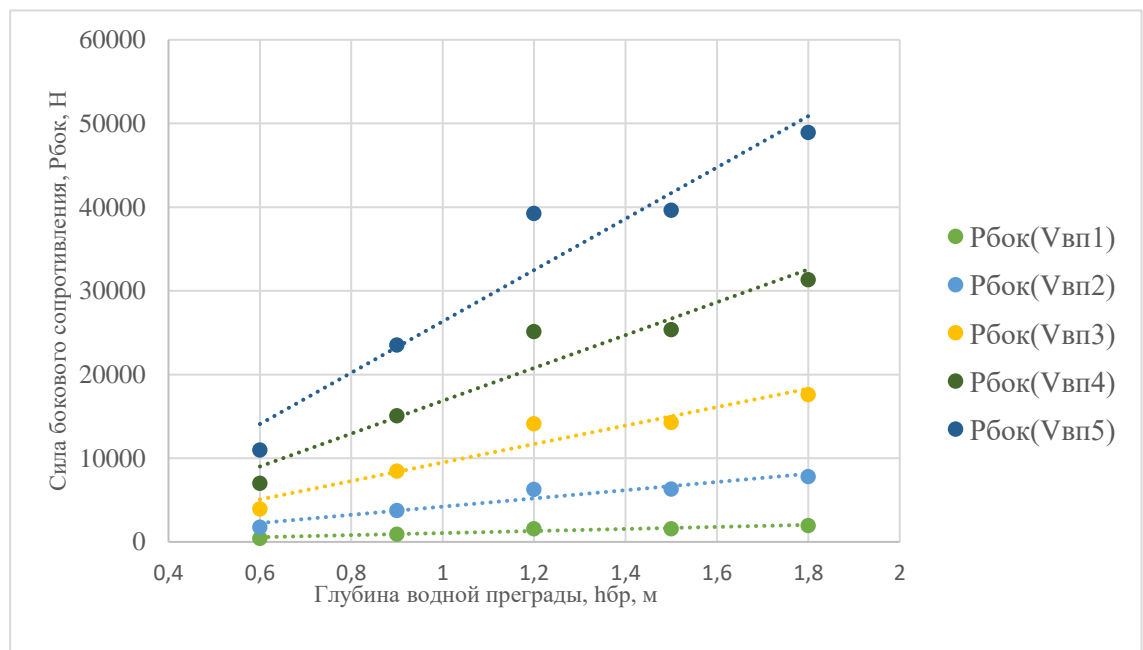


Рисунок 4.5 – Зависимость бокового гидродинамического давления от уровня водной преграды

Нормальные реакции на левом и правом бортах ТТМ, полученные по формулам (2.3) – (2.4), представлены на рисунке 4.6 – 4.9.

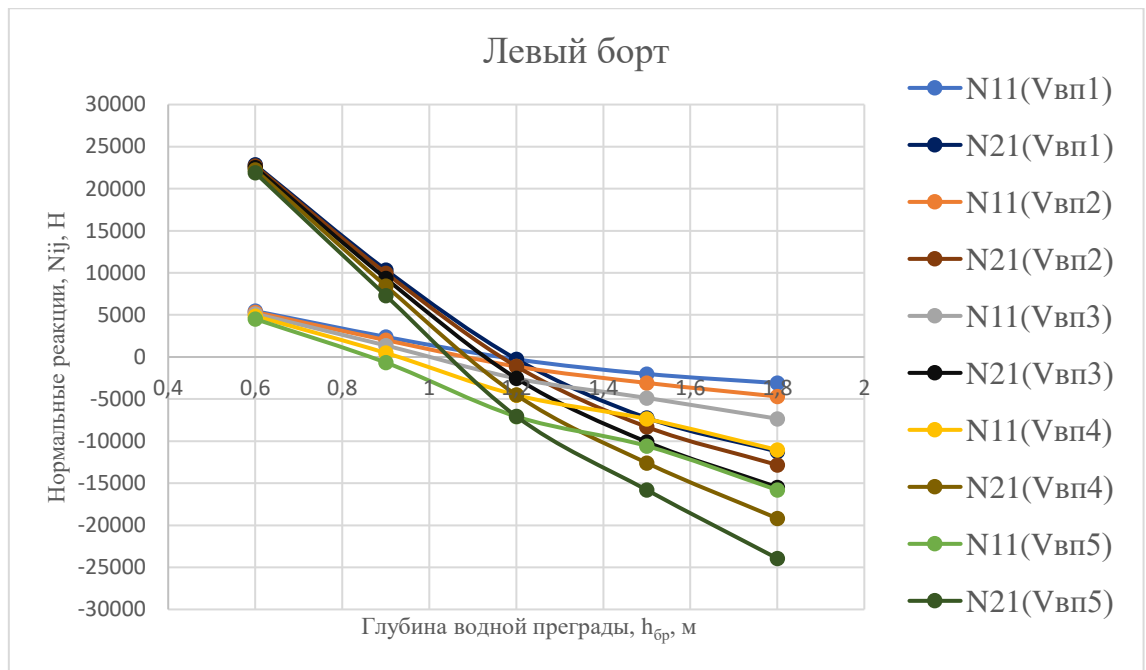


Рисунок 4.6 – Распределение нормальных реакций на колесах передней оси неподвижного экскаватора-погрузчика при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$

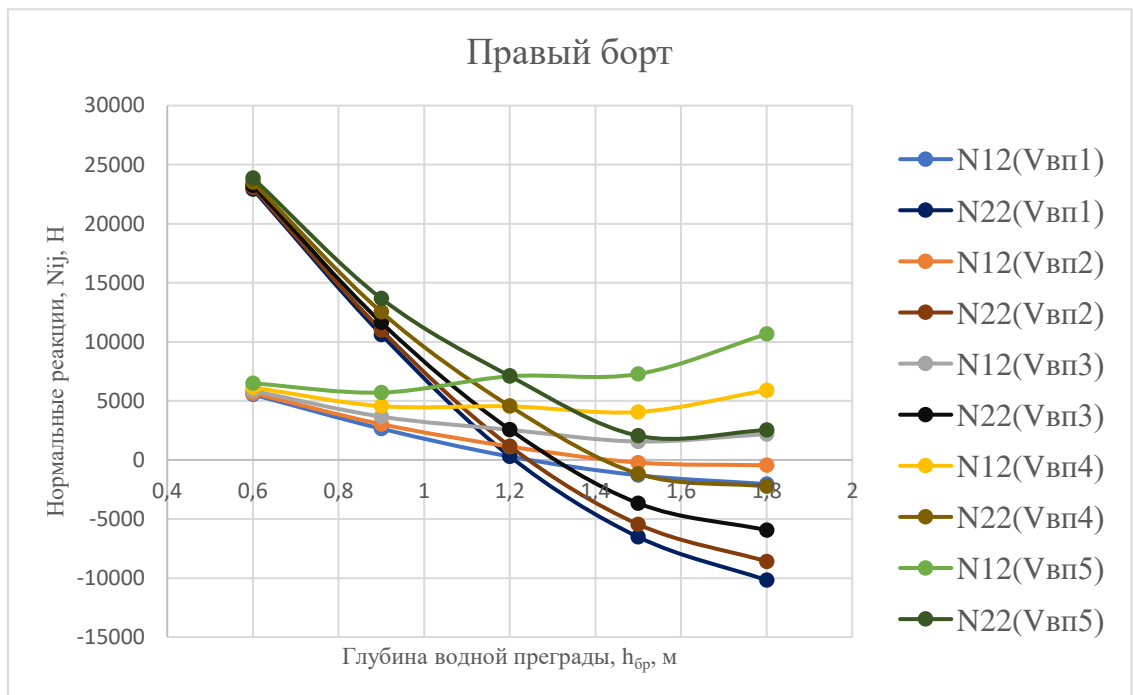


Рисунок 4.7 – Распределение нормальных реакций на колесах задней оси неподвижного экскаватора-погрузчика при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$

Глубины потери сцепления колес передней и задней осей неподвижного экскаватора-погрузчика при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Глубины потери сцепления колес передней и задней осей неподвижного экскаватора-погрузчика при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, м				
1-я ось, левое колесо, N11	1,2	1,075	1	0,95	0,875
1-я ось, правое колесо, N12	1,2	1,5	–	–	–
2-я ось, левое колесо, N21	1,2	1,175	1,15	1,09	1,05
2-я ось, правое колесо, N22	1,2	1,25	1,3	1,4	–

Из рисунков 4.6 и 4.7 видно, что реакции на передней оси становятся отрицательными при обтекании ТТМ водным потоком со скоростью 0,5 м/с на глубине 1,2 м, а при скорости обтекания 2,5 м/с – на глубине 1,05 м. Реакции на задней оси становятся отрицательными только на глубине 1,5 м при скорости обтекания 1 м/с. Из графиков видно, что разгружается левый борт и нагружается правый, в связи с чем при больших боковых скоростях обтекания возможно опрокидывание.

4.2.4 Определение силы лобового и бокового сопротивления при прямолинейном движении транспортно-технологической машины с постоянной скоростью при боковом обтекании водной преграды с постоянной скоростью

Реакции на правом и левом бортах при прямолинейном движении ТТМ с постоянной скоростью при боковом обтекании, полученные по формулам (2.3) – (2.4), представлены на рисунках 4.8 – 4.11.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунках 4.8 – 4.9, демонстрирует, что при преодолении экскаватором-погрузчиком водной преграды глубиной 0,6 – 0,9 м наблюдается равномерное распределение нагрузки между левым и правым бортами. Это объясняется незначительным водоизмещением ходовой части, погруженной в воду на глубину примерно дорожного просвета и малыми площадями ее поперечного и продольного сечений. При увеличении глубины водного потока до 1 м возникает резкое перераспределение нагрузки между бортами автомобиля, при этом большая нагрузка приходится на правый борт, что в свою очередь может приводить к сносу экскаватора-погрузчика от прямолинейного движения и даже к опрокидыванию.

В таблицах 4.5 и 4.6 приведены значения глубин для пяти скоростей течения водного потока и двух скоростей движения экскаватора-погрузчика, при которых на колесах передней и задней осей нормальные реакция становятся нулевыми. Обозначение (–) показывает, что нормальная реакция не достигает нулевого значения.

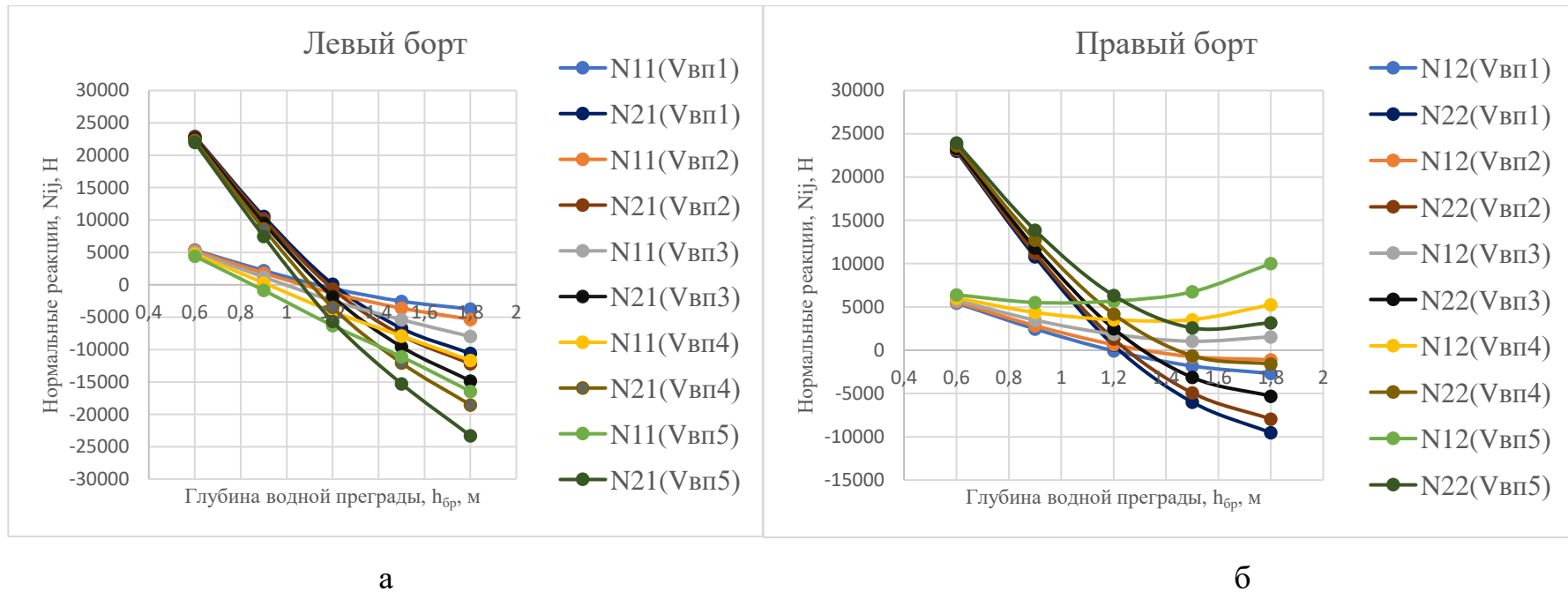


Рисунок 4.8 – Распределение нормальных реакций на колесах (а) передней и (б) задней осей экскаватора-погрузчика, движущегося на 1-й передаче при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$

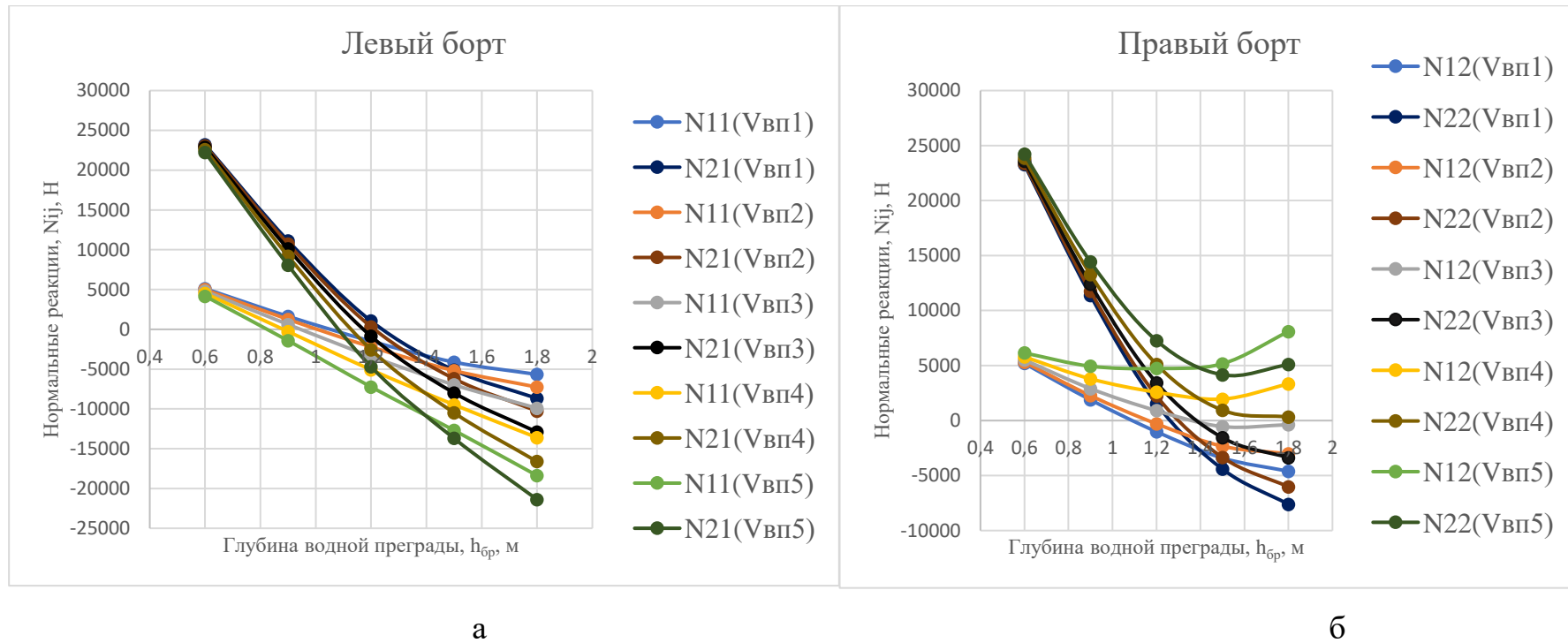


Рисунок 4.9 – Распределение нормальных реакций на колесах (а) передней и (б) задней осей экскаватора-погрузчика, движущегося на 2-й передаче при скоростях бокового обтекания водным потоком $V_{вп1} - V_{вп5}$

Таблица 4.5 – Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 1-й передаче

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, $h_{бр}$, м				
1-я ось, левое колесо, N11	1,2	1,1	1	0,9	0,85
1-я ось, правое колесо, N12	1,2	1,35	–	–	–
2-я ось, левое колесо, N21	1,2	1,19	1,15	1,1	1,035
2-я ось, правое колесо, N22	1,2	1,25	1,3	1,45	–

Проведенные исследования выявили критические глубины потери управляемости экскаватора-погрузчика при форсировании водных преград. Установлено, что максимальная глубина сохранения управляемости составляет 1,2 м при движении на первой передаче со скоростью водного потока 0,5 м/с. Минимальный порог управляемости зафиксирован на глубине 0,85 м при скорости потока 2,5 м/с.

Анализ условий опрокидывания машины показал, что критическая глубина составляет 1,2 м при скорости потока 0,5 м/с и уменьшается до 1,035 м при скорости потока 2,5 м/с. Процесс опрокидывания характеризуется полной потерей контакта колес левого борта с опорной поверхностью при сохранении положительных значений нормальных реакций на правом борту. Данное явление обусловлено действием гидродинамических выталкивающих сил и моментов, превышающих стабилизирующее влияние силы тяжести машины.

Таблица 4.6 – Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 2-й передаче

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, $h_{бр}$, м				
1-я ось, левое колесо, N11	1,025	1	0,95	0,9	0,8

1-я ось, правое колесо, N12	1,1	1,2	1,4	–	–
2-я ось, левое колесо, N21	1,25	1,2	1,09	1,15	1,1
2-я ось, правое колесо, N22	1,3	1,35	1,4	–	–

Максимальная глубина, при которой происходит потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси) составляет 1,025 м при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче при скорости водного потока равной 0,5 м/с, минимальная глубина – 0,8 м при скорости водного потока 2,5 м/с.

Опрокидывание машины возникает на глубине 1,1 м для скорости водного потока 2,5 м/с, поскольку происходит полный отрыв всех колес левого борта, при этом нормальные реакции на правом борту остаются положительными.

Таким образом, исходя из выполненного расчета можно сделать вывод, что колесный экскаватор-погрузчик способен преодолевать водную преграду вброд глубиной в 1 м, что в 1,8 раз больше, чем заявленный заводской уровень бродоходимости, равный 0,55 м.

4.2.5 Определение сил сопротивления боковому скольжению

Сила тяги по сцеплению определяется по формуле (2.17):

$$P_{\varphi} = \varphi \cdot G = 0,65 \cdot 0,85 \cdot 84954,6 = 55220,5 \text{ Н.}$$

Результаты расчета суммы боковых реакций на колесах экскаватора-погрузчика для пяти контрольных значений скорости водного потока представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сумма боковых реакций на колесах экскаватора-погрузчика для пяти контрольных значений скорости водного потока

	Сумма боковых реакций на колесах экскаватора-погрузчика, S1+S2, Н				
При $V_{вп1} = 0,5 \text{ м/с}$	439,63	941,81	1328,49	1585,26	1958,23

При $V_{вп2} = 1 \text{ м/с}$	1758,51	3767,23	5313,95	6341,04	7832,93
При $V_{вп3} = 1,5 \text{ м/с}$	3956,65	8476,27	11956,39	14267,33	17624,10
При $V_{вп4} = 2 \text{ м/с}$	7034,04	15068,92	21255,80	25364,14	31331,74
При $V_{вп5} = 2,5 \text{ м/с}$	10990,68	23545,19	33212,19	39631,48	48955,84

Зависимость бокового сопротивления от глубины водной преграды представлена на рисунке 4.10.

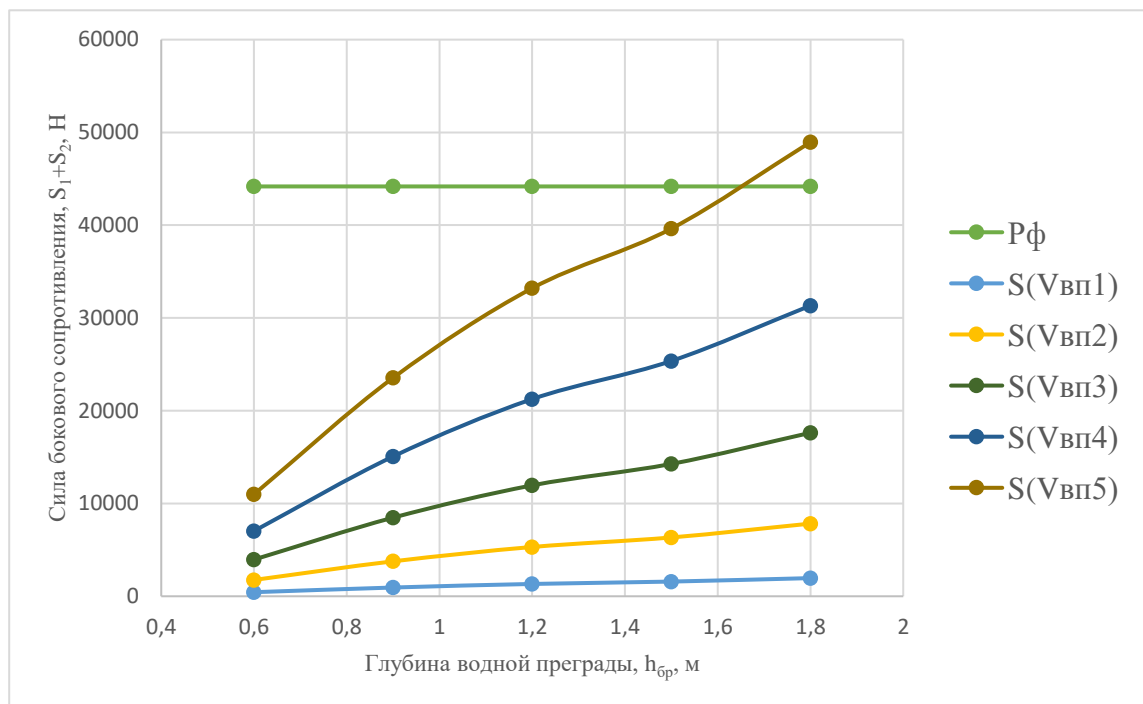


Рисунок 4.10 – Зависимость бокового сопротивления от глубины водной преграды

Таким образом, из рисунка 4.10 видно, что скольжение экскаватора-погрузчика начнется при скорости водного потока равного 2,5 м/с на глубине водной преграды 1,7 м.

Тогда сила тяги экскаватора погрузчика для движения на 1-й передаче составит:

$$P_{тяги}^{1-я\ передача} = \frac{425 \cdot 7,97 \cdot 4,625}{0,645} \cdot 0,85 = 20645,16 \text{ Н.}$$

Сила тяги для движения на 2-й передаче:

$$P_{\text{тяги}}^{2\text{-я передача}} = \frac{425 \cdot 4,29 \cdot 4,625}{0,645} \cdot 0,85 = 11\,112,6 \text{ Н.}$$

Сила сопротивления качению движителя:

$$P_f = 84954,6 \cdot 0,03 = 2973,4 \text{ Н.}$$

Значения суммы всех сил, действующих на колесо в зоне пятна контакта P_{Σ} представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения суммы всех сил, действующих на колесо в зоне пятна контакта P_{Σ} для пяти параметров уровня водной преграды при движении на 1-й и 2-й передачах

Глубина брода, $h_{\text{бр}}, \text{ м}$ Скорость движения	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
	Сумма всех сил, действующих на колесо в зоне пятна контакта P_{Σ}				
$V_1, \text{ м/с}$	4874,56	5784,40	6460,67	7652,96	7720,86
$V_2, \text{ м/с}$	10578,02	14217,37	16922,44	21691,62	21963,21

Изменение суммы сил сопротивлений P_{Σ} в пятне контакта колеса, тягового усилия $P_{\text{тяги}}$ и силы тяги по сцеплению P_{φ} , от глубины водной преграды представлено на рисунке 4.11.

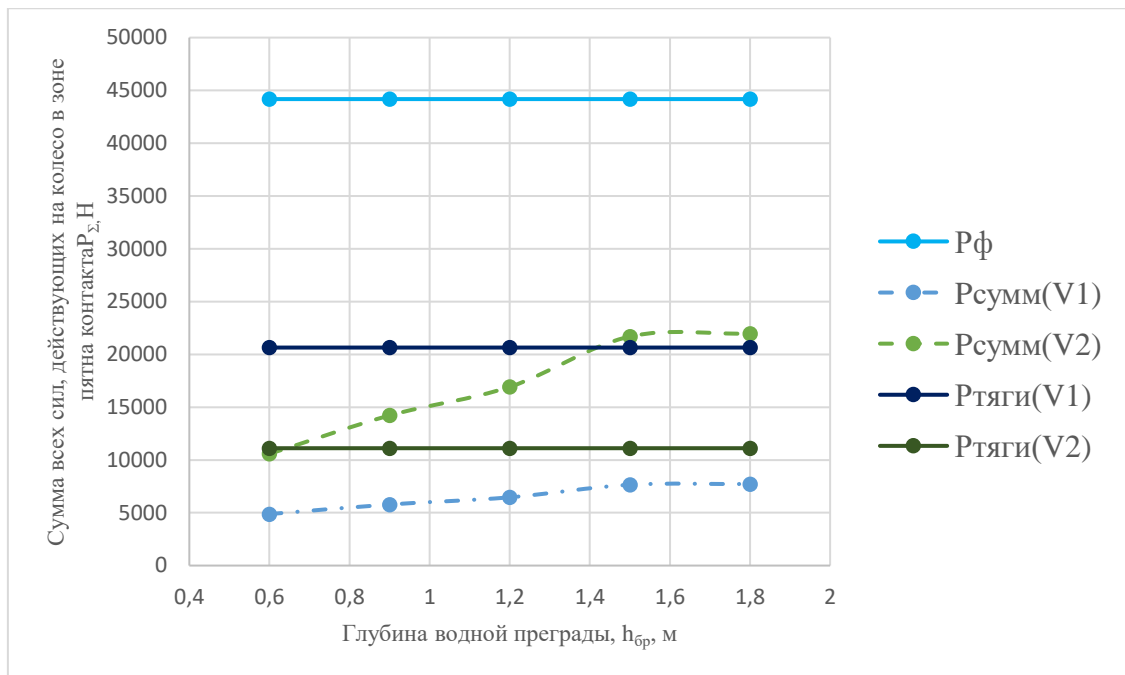


Рисунок 4.11 – Зависимость суммы сил сопротивлений P_{Σ} в пятне контакта колеса, тягового усилия $P_{тяги}$ и силы тяги по сцеплению P_{ϕ} , от глубины водной преграды

Из рисунка 4.11 видно, что при движении экскаватора-погрузчика на первой передаче для всех заданных глубин водной преграды выполняется условие $P_{\phi} \geq P_T \geq P_{\Sigma}$. Однако при движении на 2-й передаче силы тяги ходового оборудования экскаватора-погрузчика становится недостаточной для преодоления сопротивлений, в связи с чем колесный движитель не сможет провернуться, и двигатель заглохнет.

4.3 Сравнение сил, полученных экспериментальным и расчетным методами

Цель данного раздела заключается в проведении сравнительного анализа сил сопротивления, определенных экспериментальным путем с использованием коэффициентов сопротивления, и результатов, полученных средствами численного моделирования. На рисунках 4.12 – 4.13 представлены графики сравнения сил лобового и бокового сопротивления для разных глубин погружения.

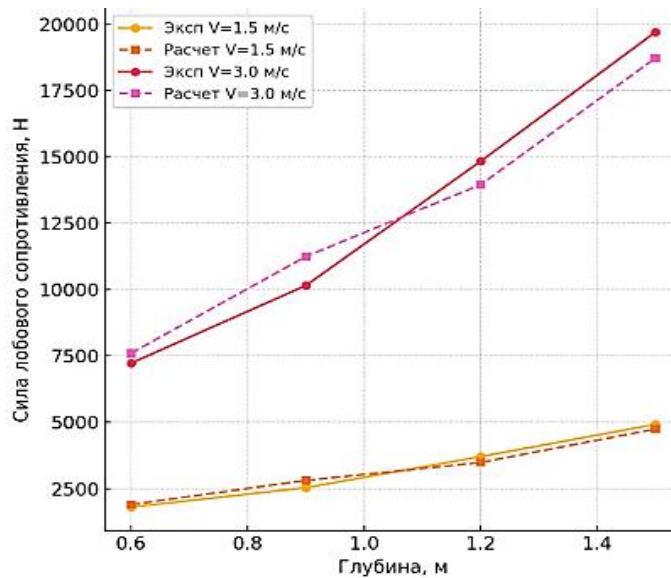


Рисунок 4.12 – Сравнение результатов экспериментального и расчетного лобового сопротивления

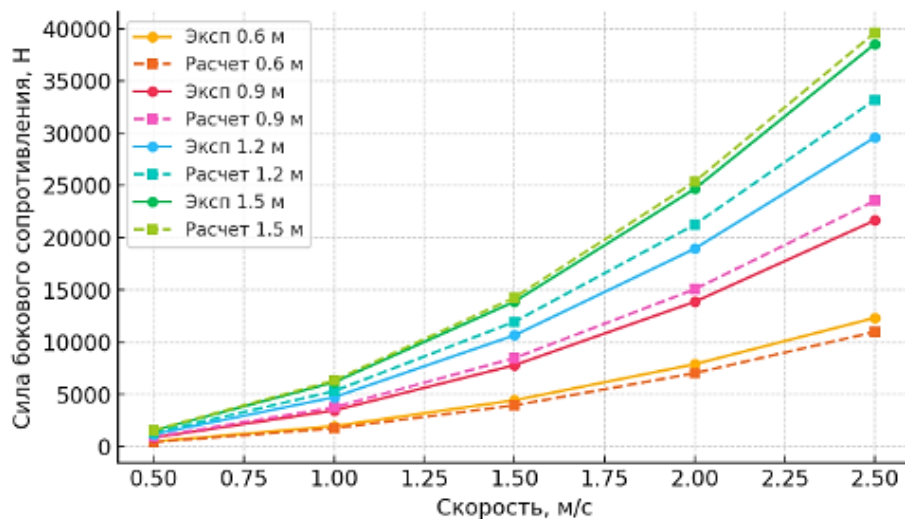


Рисунок 4.13 – Сравнение результатов экспериментального и расчетного бокового сопротивления

На основании представленных графиков и анализа данных можно сделать следующие выводы. Сравнение экспериментальных и расчетных значений лобового сопротивления показывает, что при скорости 1,5 м/с численное моделирование дает результаты, близкие к экспериментальным, особенно при меньших глубинах погружения. Расхождения находятся в пределах 5 – 10 %, что указывает на хорошую сходимость модели при этих условиях. Однако при увеличении скорости до 3 м/с расчетные значения начинают недооценивать силу

лобового сопротивления на всех глубинах. Особенно заметно это проявляется при глубине 1,2 м, где отклонение достигает порядка 15 %. Это может быть связано с тем, что численная модель не в полной мере учитывает нелинейные эффекты, возникающие при высоких скоростях и значительных глубинах погружения.

Анализ данных по боковому сопротивлению показывает иную картину. При низких скоростях движения (0,5 – 1 м/с) расчетные значения значительно занижают силу сопротивления по сравнению с экспериментом. Особенно сильно это проявляется при глубинах 1,2 и 1,5 м, что может быть обусловлено недостаточной чувствительностью модели к вязкостным силам в условиях малых скоростей. Однако с увеличением скорости до 1,5 – 2 м/с точность расчетов значительно возрастает. При глубинах 1,2 и 1,5 м численные значения начинают хорошо согласовываться с экспериментальными, расхождения находятся в диапазоне 10 – 15 %.

Таким образом, численное моделирование хорошо воспроизводит поведение сопротивлений при высоких скоростях и больших глубинах, но требует корректировки в случае малых скоростей и умеренных погружений.

4.4 Технико-экономическое обоснование способов доставки экскаватора-погрузчика JCB 4CX через водную преграду

Целью технико-экономического обоснования (далее – ТЭО) является сравнение операционных затрат (без учета амортизации и износа) на доставку экскаватора-погрузчика JCB 4CX через водную преграду тремя способами: своим ходом вброд, переправой на самоходном пароме и с использованием вертолета на внешнем подвесе.

Для исследования затрат на перемещения экскаватора-погрузчика паромом была выбрана специализированная самоходная гусеничная плавающая инженерная машина ПТС-2, обеспечивающая транспортировку колесной и гусеничной техники полной массой до 12 тонн, как по местности, так и по воде, что полностью соответствует задаче переправы экскаватора-погрузчика JCB 4CX полной массой 8,66 тонны [178].

Оценка затрат на авиационное транспортирование проводилась применительно к вертолету Ми-26, обладающему возможностью транспортирования на внешнем подвесе грузов массой до 20 тонн [179].

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Исходные данные для проведения технико-экономического обоснования способов доставки экскаватора-погрузчика JCB 4CX через водную преграду

№ п/п	Характеристика	Значение
Перевозимая техника – экскаватор-погрузчик JCB 4CX		
1	Масса, кг	8660
2	Расход топлива при движении, л/ч: по суше вброд	12 18
3	Экипаж, чел	1
4	Скорость движения на суше, км/ч	38
5	Скорость движения в воде, км/ч	5,4
Гусеничный плавающий транспортер ПТС-2		
6	Грузоподъемность, кг	12000
7	Средний расход топлива на воде с грузом, л/ч	71
8	Средний расход топлива на 100 км пути с грузом по грунтовой дороге, л	245
9	Экипаж, чел	2
10	Скорость движения на суше, км/ч	34
11	Скорость движения в воде, км/ч	11,7
Вертолет Ми-26		
12	Грузоподъемность, кг	20000
13	Расход топлива, л/ч	3000
14	Экипаж, чел	5
15	Скорость движения, км/ч	120
Параметры доставки		
16	Глубина водной преграды, м (расчетный уровень бродоходимости JCB 4CX)	1,0
17	Ширина водной преграды, м	100
18	Авиамаршрут вертолета – стандартная дальность авиаперелета для оперативной переброски техники в труднодоступных районах, км	100

19	Стоимость дизельного топлива, руб/л (на 26.07.2025 [180])	71,2
20	Стоимость авиационного керосина, руб/л (на 26.07.2025 [181])	91,5
21	Расстояние от района сосредоточения группировки НАСФ до границы водной преграды – промежуточные пункты эвакуации (далее – ППЭ), км [182]	20

Произведем расчет затрат времени, топлива и фонд оплаты труда при преодолении водной преграды различными способами. Для оценки зарплаты экипажа примем среднюю часовую ставку 500 руб/час (реальная ставка может отличаться).

1. Преодоление водной преграды своим ходом вброд.

Время преодоления расстояния от места дислокации до водной преграды составит:

$$\frac{20 \text{ км}}{38 \text{ км/ч}} = 0,52 \text{ ч.}$$

Время преодоления водной преграды экскаватором-погрузчиком составит:

$$\frac{0,1 \text{ км}}{5 \text{ км/ч}} = 0,02 \text{ ч.}$$

Общие временные затраты составляют – 0,54 ч (32,4 мин).

Тогда расход топлива составит:

$$12 \frac{\text{л}}{\text{ч}} \cdot 0,52 \text{ ч} + 18 \frac{\text{л}}{\text{ч}} \cdot 0,02 \text{ ч} = 6,6 \text{ л.}$$

Тогда стоимость топлива:

$$6,6 \text{ л} \cdot 71,2 \frac{\text{руб}}{\text{л}} = 470 \text{ руб.}$$

Зарплата экипажа:

$$1 \text{ чел} \cdot 0,54 \text{ ч} \cdot 500 \text{ руб} = 270 \text{ руб.}$$

2. Доставка с использованием плавающего транспортера ПТС-2.

Погрузка экскаватора-погрузчика на платформу: 5 мин (0,083 часа).

Время преодоления расстояния от места дислокации НАСФ до водной преграды составит:

$$\frac{20 \text{ км}}{34 \text{ км/ч}} = 0,58 \text{ ч.}$$

Время преодоления водной преграды экскаватором-погрузчиком составит:

$$\frac{0,1 \text{ км}}{11,7 \text{ км/ч}} = 0,01 \text{ ч.}$$

Выгрузка: 5 мин (0,083 часа).

Итого время работы ПТС-2:

$$0,083 \text{ (погрузка)} + 0,58 \text{ (движение)} + 0,01 \text{ (плавание)} + \\ + 0,083 \text{ (выгрузка)} = 0,756 \text{ ч (45,4 мин)}$$

Тогда расход топлива составит:

$$245 \cdot 0,2 \text{ л} + 71 \frac{\text{л}}{\text{ч}} \cdot 0,01 \text{ ч} = 49,71 \text{ л.}$$

Тогда стоимость топлива:

$$49,71 \text{ л} \cdot 71,2 \frac{\text{руб}}{\text{л}} = 3539,5 \text{ руб.}$$

Зарплата экипажа:

$$2 \text{ чел} \cdot 0,58 \text{ ч} \cdot 500 \text{ руб} = 580 \text{ руб.}$$

3. Доставка с использованием вертолета на внешней подвеске.

Использование Ми-26 для транспортировки экскаватора-погрузчика по времени включает перелет к месту загрузки, посадку, швартовку машины на подвесной платформе, зацепление, взлет, перелет через водную преграду, зависание, отцепку, посадку:

- перелет к месту загрузки в район дислокации НАСФ (100 км) – 0,83 ч;
- швартовка и зацепление груза: 20 мин (0,33 часа) в районе дислокации;
- время перелета 20 км +100 м на малой высоте с грузом: 0,1675 ч;
- отцепка и окончание работ: 10 мин (0,167 часа) на берегу.

Итого время работы Ми-26: перелет: 0,83 (перелет к НАСФ) + 0,33 (подготовка/зацепление) + 0,1675 (полет над водной преградой) + 0,167 (отцепка и окончание) = ~1,5 часа.

Тогда расход топлива составит:

$$3000 \frac{\text{л}}{\text{ч}} \cdot 1,5 \text{ч} = 4483,5 \text{ л.}$$

Тогда стоимость топлива:

$$5583,5 \text{ л} \cdot 91,5 \frac{\text{руб}}{\text{л}} = 410240,25 \text{ руб.}$$

Зарплата экипажа:

$$5 \text{ чел} \cdot 1,5 \text{ ч} \cdot 500 \text{руб} = 3750 \text{ руб.}$$

Временные оценки для ПТС-2 и Ми-26 усредненные и могут варьироваться в зависимости от условий, подготовки экипажа и состояния техники.

В таблице 4.10 представлены сводные данные по затратам на доставку экскаватора-погрузчика через водную преграду шириной 100 м тремя способами.

Таблица 4.10 – Сводная таблица затрат на доставку экскаватора-погрузчика через водную преграду шириной 100 м тремя способами

Способ доставки	Затраты на топливо, руб.	Затраты на зарплату, руб.	ИТОГО затраты, руб.
Своим ходом	470	270	740
Паромом ПТС-2	3539,5	580	4119,5
Вертолетом Ми-26	410240,25	3750	413990,25

На основании проведенного ТЭО, учитывающего только операционные затраты (топливо и зарплату экипажей) без амортизации и износа техники, для доставки экскаватора-погрузчика JSB 4CX через водную преграду глубиной 1 м и шириной 100 м при подтвержденной его проходимости вброд, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее экономически эффективным способом является переправа своим ходом вброд. Затраты на эту операцию минимальны и обусловлены лишь небольшим дополнительным расходом топлива экскаватором во время движения по дну водной преграды.

2. Использование для переправы гусеничного плавающего транспортера ПТС-2 дорожке преодоления вброд в 5,6 раза. Основные затраты связаны с высоким расходом топлива самого ПТС-2 во время движения. Этот способ оправдан при невозможности движения вброд (большая глубина, сильное течение, илистое дно и т.п.).

3. Использование вертолета Ми-26 является крайне дорогостоящим – в 559 раз дорожке движения вброд. Такие значительные затраты вызваны высоким расходом авиационного керосина с учетом перелета от аэродрома дислокации вертолета до места загрузки и далее, через водную преграду к месту разгрузки. Этот способ экономически нецелесообразен для решения подобной задачи в стандартных условиях и рекомендуется к применению только в исключительных случаях, когда другие способы физически невозможны – широкая бурная река, болото, отсутствие подъездных путей для парома – транспортера, срочность доставки и т. п., или оправданы оперативной необходимостью и спасением людей.

Таким образом, при подтвержденной возможности преодоления машиной водной преграды своим ходом вброд (в данном случае глубиной 1 м) этот способ является не только технически осуществимым, но и наиболее экономически выгодным.

Выводы по главе 4

1. На основании проведенной расчетной оценки установлены ключевые гидростатические, гидродинамические и геометрические параметры, ограничивающие способность экскаватора-погрузчика преодолевать водные преграды вброд.

2. Разработан алгоритм оценки бродоходимости, который продемонстрировал свою эффективность при анализе различных режимов движения машин в водной среде. Особое внимание было уделено исследованию лобового и бокового сопротивления, которые оказывают решающее влияние на устойчивость и управляемость техники. Установлено, что критическая глубина преодоления водных преград для большинства колесных ТТМ составляет 0,8 – 1,0

метра, при этом важнейшими факторами, определяющими проходимость, являются скорость движения машины и скорость течения воды.

Установлено, что влияние кажущейся скорости на расчет лобового сопротивления несущественно в заданных условиях, что позволяет использовать упрощенные модели без значительной потери точности.

Расчетная сила тяги по сцеплению обеспечивает достаточный запас для преодоления сопротивления воды при глубине до 1 м, подтверждая бродоходимость машины при движении на 1-й передаче.

Проведенные расчеты и эксперименты позволили выявить закономерности изменения гидродинамических характеристик в зависимости от геометрии машины и условий эксплуатации.

В целом, расчетный метод доказал свою применимость для предварительного инженерного анализа проходимости экскаватора-погрузчика через водные преграды вброд, без использования других переправочных средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен системный анализ факторов, ограничивающих применение ТТМ для работы в зонах затопления. Установлено, что факторами, принципиально ограничивающими бродоходимость машин, являются гидростатическое воздействие и гидродинамическое сопротивление водной среды, а также тягово-сцепные возможности машины при движении по донным опорным поверхностям.

2. Разработана математическая модель прямолинейного движения колесной ТТМ через водную преграду вброд по слабдеформируемому донному основанию, учитывающая гидродинамические силы (лобовое и боковое сопротивление), выталкивающий эффект в зависимости от степени погружения, взаимодействие колес с донным грунтом. Модель позволяет прогнозировать критические режимы движения машины и параметры водной среды, при которых происходит подвсплытие машины, потеря управляемости и опрокидывание: в частности, установлено, что критическими параметрами, ограничивающими бродоходные свойства экскаватора-погрузчика модели JCB 4CX на слабдеформируемом донном основании, являются глубина брода более 1,0 м при скорости течения водного потока более 2,5 м/с.

3. Разработаны и верифицированы имитационные модели гидростатического и гидродинамического взаимодействия машины с водной средой, позволяющие определять объемное водоизмещение и коэффициенты гидродинамического сопротивления формы при лобовом и боковом обтекании ее водой.

4. Для подтверждения теоретических расчетных данных проведены гидростатические и аэродинамические экспериментальные исследования на масштабной физической модели ТТМ. В ходе экспериментов определено объемное водоизмещение машины для различных глубин погружения, определены коэффициенты аэродинамического сопротивления модели с последующим пересчетом в коэффициенты гидродинамических сопротивлений модели и натурального образца, оценено влияние скорости течения и его направления на устойчивость движения машины. Полученные данные использованы для оценки

достоверности и уточнения математической и имитационной моделей.

5. На основе проведенных исследований предложен комплексный метод оценки бродоходимости ТТМ, включающий методики расчетного определения критической глубины и скорости течения преодолеваемой водной преграды, алгоритмы прогнозирования потери управляемости и устойчивости машины при различных скоростных режимах ее движения вброд, дающий максимальную погрешность прогнозирования не более 12%. Применение метода возможно для анализа бродоходимости колесных машин с любыми формулами приводности, управляемости и размещения осей по базе.

6. Практическая ценность работы заключается в возможности применения разработанного метода при проектировании новых образцов ТТМ с улучшенными характеристиками бродоходимости и при разработке рекомендаций по безопасному применению серийной техники в условиях проведения аварийно-спасательных работ в зонах затоплений.

7. В рамках развития тематики планируется расширение номенклатуры исследуемых ТТМ, оценка их подвижности на различных, в том числе деформируемых, донных грунтах при различных углах обтекания и скоростях водного потока, характерных для криволинейных режимов движения.

8. В результате проведенного исследования решен комплекс научных и практических задач, направленных на повышение эффективности применения ТТМ в условиях затопления. Разработанные модели, методики и рекомендации вносят вклад в развитие теории движения транспортных машин и могут быть использованы в инженерной практике и образовательном процессе.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяются следующие сокращения и обозначения:

CAD – Computer-Aided Design (автоматизированное проектирование);

CFD – Computational Fluid Dynamics (вычислительная гидродинамика);

FEMA – Federal Emergency Management Agency (Федеральное агентство по управлению в области чрезвычайных ситуаций);

VOF – Volume of Fluid (метод отслеживания границы раздела фаз в многофазных течениях в CFD-среде ANSYS Fluent);

АДТ – аэродинамическая труба;

АСМ – аварийно-спасательные машины;

КЭМ – конечно-элементные модели;

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата;

МКЭ – метод конечных элементов;

МЧС РФ – Министерство чрезвычайных ситуаций Российской Федерации;

НАСФ – нештатные аварийно-спасательные формирования;

НГТУ им. Р.Е. Алексева – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева;

ОВ – объемное водоизмещение;

ОГЯ – опасные гидрологические явления;

ПМ – плавающие машины;

ППЭ – промежуточные пункты эвакуации;

РВД – роторно-винтовой движитель;

ТС – транспортное средство;

ТТМ – транспортно-технологические машины;

ТЭО – технико-экономическое обоснование;

ЦАГИ – Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского;

ЦТ – центр тяжести;

ЧС – чрезвычайные ситуации;

ЭВМ – электронно-вычислительные машины.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации использовались следующие термины с соответствующими определениями:

аварийно-спасательные работы: Действия по спасению людей, материальных и культурных ценностей, защите природной среды в зоне чрезвычайных ситуаций [183];

аварийно-спасательная машина: Сложное основное техническое средство для выполнения аварийно-спасательных работ, управляемое расчетом спасателей, представляющее единую систему взаимосвязанных по целевому назначению между собой и классификационными характеристиками аварийно-спасательных работ функциональных элементов, вносящих конкретный вклад в обеспечение эффективности машины [183];

ватерлиния: Линия пересечения плоскости, совпадающей с поверхностью воды с корпусом судна, представляющая собой прямую линию на проекции судна "бок" или на проекции "корпус" и имеющая свою действительную форму на проекции "полуширота" [183];

водоизмещение: Масса воды, вытесняемая корпусом судна, с учетом прикрепленного оборудования [184];

затопление: Покрытие территории водой в период половодья или паводков [185];

колесное транспортное средство: Наземное транспортное средство на колесном ходу, предназначенное для движения по безрельсовым путям [186];

опасное гидрологическое явление: Событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, возникающих под действием различных природных или гидродинамических факторов или их сочетаний, оказывающих поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду [185];

паводок: Фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей [187];

полноприводный автомобиль: Автомобиль, все колеса которого во всех или некоторых режимах работы являются ведущими [186];

половодье: Фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды, и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и ледников [185];

работоспособное состояние: Состояние изделия, при котором оно способно выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы [187];

транспортное средство: Устройство на колесном ходу категорий I, m, n, o, предназначенное для перевозки людей, грузов или оборудования, установленного на нем [188];

управляемость: Конструктивное свойство транспортного средства, заключающееся в его способности двигаться в заданном водителем направлении [186];

устойчивость: Конструктивное свойство транспортного средства, заключающееся в его способности сохранять заданное направление движения и ориентацию продольной и вертикальной осей, несмотря на внешние воздействия [186];

эксплуатация: Стадия жизненного цикла транспортного средства, на которой осуществляется его использование по назначению, с момента его государственной регистрации до утилизации [187].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачев, В. А. Особенности подготовки боевых машин иностранных армий к преодолению водных преград / В. А. Ткачев, А. Д. Фихт // Приоритетные направления повышения качества подготовки специалиста технического обеспечения: материалы VIII Межвузовской научно-методической конференции. – Омск: Омский бронетанковый инженерный институт, 2020. – С. 156 – 162.
2. Ткачев, В. А. Пути совершенствования технологического процесса подготовки танка Т-72Б3 к преодолению водной преграды / В. А. Ткачев, А. В. Нагорных, А. Д. Фихт // Наука и военная безопасность. – 2020. – № 4. – С. 69 – 73.
3. Антонов, А. С. Армейские автомобили. Теория / А. С. Антонов, Ю. А. Кононович, Е. И. Могидович, В. С. Прозоров ; под общ. ред. А. С. Антонова. – М. : Воениздат, 1970. – 525 с.
4. Аксенов, П. В. Плавающие колесные и гусеничные машины. Конструкция, теория и расчет / П. В. Аксенов, Ю. А. Кононович. – М. : Воениздат, 1963. – 270 с.
5. Ладанов, В. И. О вопросах приспособленности вооружения и военной техники преодолению водных преград на плаву / В. И. Ладанов, А. С. Емельянчик // Проблемы развития системы технического обеспечения в войсках национальной гвардии Российской Федерации и пути их решения во взаимодействии с другими видами обеспечения. – 2019. – С. 52 – 56.
6. Ладанов, В. И. Методика расчета плавучести бронетранспортера // Актуальные вопросы совершенствования системы технического обеспечения. – 2017. – С. 151 – 154.
7. Ладанов, В. И. К расчету сопротивления движению боевой машины по преодолению водных преград на плаву по модельным испытаниям // Перспективные направления развития военной и специальной техники. – 2019. – С. 5 – 8.

8. Зиновьев, С. С. К вопросу проходимости БМД-4М при преодолении водных преград / С. С. Зиновьев, В. Ф. Васильченко, А. С. Бондарев // Наука и военная безопасность. – 2022. – № 1(28). – С. 72 – 76.

9. Зиновьев, С. С. Оценка влияния волнения водной поверхности на проходимость БМД-4М / С. С. Зиновьев, В. Ф. Васильченко, Н. Н. Болгов // Динамика развития системы военного образования. – 2022. – С. 269 – 273.

10. Шаховцов, А. В. Оценка вероятности преодоления мелководных участков водных преград БТР-82А и БТР М113А3 при различных углах наклона берега / А. В. Шаховцов [и др.] // Наука и военная безопасность. – 2021. – № 1. – С. 24 – 28.

11. Шаховцов, А. В. Оценка влияния характеристик грунта на вероятность выхода БТР-82А из воды на берег при преодолении мелководных участков водной преграды / А. В. Шаховцов, О. А. Серяков, Т. А. Ивахненко // Наука и военная безопасность. – 2021. – № 2. – С. 29 – 34.

12. Ичжоу, В. Особенности моделирования кузовов скоростных амфибийных машин для расчета нагрузочных режимов при движении по воде / В. Ичжоу, В. Н. Зузов // Будущее машиностроения России: XVI всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов. В 2-х томах, Москва, 19–22 сентября 2023 года. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 78 – 83.

13. Ван, И. Расчетно-экспериментальное обоснование выбора рациональных конечно-элементных моделей кузовов скоростных амфибийных машин применительно к оптимальному проектированию / И. Ван, В. Н. Зузов, В. В. Иваненков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 5(149). – DOI: 10.18698/2308-6033-2024-5-2356.

14. Ван, И. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде / И. Ван, В. Н. Зузов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2023. – № 4(143). – С. 82–96. – DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82.

15. Ван, И. Методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS / И. Ван, В. Н. Зузов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 12(144). – DOI: 10.18698/2308-6033-2023-12-2323.
16. Карасева, С. А. Анализ гидродинамики взаимодействия структурных элементов полностью погруженных шнеков тандемной конструкции роторно-винтовых снегоболотоходов с водой / С. А. Карасева, А. В. Папунин, В. В. Беляков [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3 – 3(61). – С. 132–140. – DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.054.
17. Марковнина, А. И. Оценка эффективности транспортных средств повышенной проходимости / А. И. Марковнина, В. С. Макаров, А. В. Папунин [и др.] // Транспортные системы. – 2023. – № 1(27). – С. 4–11. – DOI: 10.46960/2782-5477_2023_1_4.
18. Экспериментальное исследование физико-механических свойств снежно-песчаных смесей как полотна пути для транспортно-технологических машин / А. М. Беляев, А. И. Марковнина, В. В. Беляков, В. С. Макаров // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: материалы IV Байкальской международной научной конференции – стратегической сессии. – Иркутск: ООО «Репроцентр А1», 2022. – С. 24–29.
19. Критерий подвижности по проходимости колесных ТТМ / А. И. Марковнина, В. С. Макаров, У. Ш. Вахидов, В. В. Беляков // XXVII Нижегородская сессия молодых ученых: технические, естественные, математические науки: материалы сессии. Т. 27. – Н. Новгород: Перо, 2022. – С. 19–23.
20. Зайцев, С. В. Сопротивление движению амфибийных двухзвенных гусеничных транспортеров на воде / С. В. Зайцев, Д. Ю. Малахов // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 9. – С. 21–24.
21. Зайцев, С. В. Определение коэффициента демпфирования для двухзвенной гусеничной амфибийной машины / С. В. Зайцев, В. М. Чичеров //

Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 2(61). – С. 17–23.

22. Малахов, Д. Ю. Амфибийная роторно-винтовая платформа для рейдовой разгрузки судов / Д. Ю. Малахов, С. В. Зайцев, С. А. Карасева // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 3(66). – С. 27–34.

23. К вопросу о применении интеллектуальных систем управления на гусеничных и амфибийных машинах / М. П. Малиновский, С. В. Зайцев, М. А. Жалнин, Е. С. Смолко // Наука и техника в дорожной отрасли : материалы конференции. Т. 2. – М. : МАДИ, 2021. – С. 25–27.

24. Амфибийная шнекороторная платформа для рейдовой разгрузки судов / Н. А. Филиппова, С. В. Зайцев, Д. Ю. Малахов, С. А. Карасева // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера : сборник материалов III Всероссийского форума. – Якутск: Изд-во СВФУ, 2022. – С. 162–170.

25. Добромиров, В. Н. Автомобили двойного назначения. Основы теории специальных свойств. – М. : Глобал-Концепт, 2000. – 225 с.

26. Bocanegra, R. A. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding / R. A. Bocanegra, F. Francés // Journal of Flood Risk Management. – 2021. – Vol. 14, № 4. – Art. e12738. – DOI: 10.1111/jfr3.12738.

27. Hu, X. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations / X. Hu, J. Li, W. Wang, X. Fang // Journal of Hydrology. – 2023. – Vol. 620. – Art. 129525. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129525.

28. Shu, C. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters / C. Shu, J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin // Journal of Hydraulic Research. – 2011. – Vol. 49, № 6. – P. 709–717. – DOI: 10.1080/00221686.2011.616318.

29. Xia, J. Formula of incipient velocity for flooded vehicles / J. Xia, F. Y. Teo, B. Lin, R. A. Falconer // Natural Hazards. – 2011. – Vol. 58. – P. 1–14. – DOI: 10.1007/s11069-010-9639-x.

30. Teo, F. Y. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows / F. Y. Teo, J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin // *International Journal of River Basin Management*. – 2012. – Vol. 10, № 2. – P. 149–160. – DOI: 10.1080/15715124.2012.674040.
31. Teo, F. Y. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles / F. Y. Teo, Y. S. Liew, R. A. Falconer, B. Lin // *IAHR World Congress*. – Chengdu, China, 2013.
32. Xia, J. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies / J. Xia, R. A. Falconer, X. Xiao, Y. Wang // *Natural Hazards*. – 2014. – Vol. 70. – P. 1619–1630. – DOI: 10.1007/s11069-013-0889-2.
33. Arrighi, C. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles / C. Arrighi, J. C. Alcèrreca-Huerta, H. Oumeraci, F. Castelli // *Journal of Fluids and Structures*. – 2015. – Vol. 57. – P. 170–184. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010.
34. Kramer, M. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings / M. Kramer, K. Terheiden, S. Wieprecht // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2016. – Vol. 17. – P. 77–84. – DOI: 10.1016/j.ijdrr.2016.04.003.
35. Martinez-Gomariz, E. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding / E. Martinez-Gomariz, M. Gomez, B. Russo, S. Djordjević // *Urban Water Journal*. – 2017. – Vol. 14, № 9. – P. 930–939. – DOI: 10.1080/1573062X.2017.1301501.
36. Pregolato, M. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function / M. Pregolato, A. Ford, S. M. Wilkinson, R. J. Dawson // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2017. – Vol. 55. – P. 67–81. – DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.020.
37. Тухватуллин, Б. Т. Повышение проходимости автомобильной техники (боевых колесных машин) / Б. Т. Тухватуллин, Д. В. Левченко, О. Л. Ходоркин, И. В. Зольников // *International Journal of Advanced Studies*. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 65–75.

38. ГОСТ 22653 – 77. Автомобили. Параметры проходимости. Термины и определения. – Введ. 1978 – 01 – 01. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.
39. Кутьков, Г. М. Тракторы и автомобили: Теория и технологические свойства. – М. : Колосс, 2004. – 504 с.
40. Лукашук, Е. Р. (Магдина Е.Р.) Условия применения самоходных строительных машин в зонах подтопления рек Арктического региона / Е. Р. Лукашук (Е.Р. Магдина), В. Н. Добромиров // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 18 – 22.
41. Магдина, Е. Р. Проблемные вопросы применения дорожно-строительных машин в зонах затопления / Е. Р. Магдина, В. Н. Добромиров // Русский инженер. – 2023. – № 3(80). – С. 40 – 43.
42. Турдалиева, Б. С. Анализ международного опыта организации медицинской помощи населению в чрезвычайных ситуациях / Б. С. Турдалиева [и др.] // Вестник Казахского Национального медицинского университета. – 2017. – № 1. – С. 538–542.
43. Рыбаков, А. В. Общая постановка задачи обоснования объемов инженерно-технических мероприятий по снижению ущерба от наводнений в случае прорыва гидротехнического сооружения / А. В. Рыбаков [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 2 (41). – С. 78–86.
44. Рыбаков, А. В. Модель оценки последствий наводнений от объема инженерно-технических мероприятий, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций / А. В. Рыбаков [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 4 (43). – С. 93–99.
45. Кичигина, Н. В. Наводнения Сибири: географический и статистический анализ за период климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 41–60.
46. Белоусова, А. П. Оценка рисков подтопления территорий подземными водами при наводнениях // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 1. – С. 30–38.
47. Акимов, В. А. Риски катастрофических наводнений на территории России в начале XXI века: анализ и управление / В. А. Акимов, В. В. Лесных,

Ю. И. Соколов // Оценка и управление природными рисками: материалы конф. «Риск 2003». Т. 1. – М. : РУДН, 2003. – С. 293–297.

48. Caretta, M. A. Water / M. A. Caretta, A. Mukherji, M. Arfanuzzaman [et al.] // *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2022. – P. 551–712. – DOI: 10.1017/9781009325844.006.

49. The International Disaster Database. 2023 Annual Report [Электронный ресурс] / Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). – Brussels : CRED, 2023. – 45 с. URL: https://files.emdat.be/reports/2023_EMDAT_report.pdf (дата обращения: 12.03.2025).

50. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022: Our World at Risk* [Электронный ресурс]. – Geneva : UNDRR, 2022. – 256 p. – URL: <https://www.undrr.org/gar/gar2022-our-world-risk-gar> (дата обращения: 15.06.2024).

51. The World Bank. *Climate and Development: An Agenda for Action – Emerging Insights from World Bank Group 2021 – 22 Country Climate and Development Reports* [Электронный ресурс]. – Washington, DC : World Bank, 2023. – 156 p. – URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099031924075011175/pdf/P50170713a83500ce1a2461d7d8df026d11.pdf> (дата обращения: 15.06.2024).

52. World Meteorological Organization. *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water-related Hazards (1970 – 2021)* [Электронный ресурс]. – Geneva : WMO, 2023. – XII, 90 p. – (WMO – N 1347). – ISBN 978 – 92 – 63 – 11347 – 4. – URL: <https://wmo.int/publication-series/atlas-of-mortality-and-economic-losses-from-weather-climate-and-water-related-hazards-1970-2021> (дата обращения: 15.06.2024).

53. Siswanto, S. Trends in High-Daily Precipitation Events in Jakarta and the Flooding of January 2014 / S. Siswanto, G. J. Van Oldenborgh, G. Schrier, G. Lenderink, B. Hurk // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2015. – Vol. 96. – P. S131–S135. – DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00128.1.

54. Van Oldenborgh, G. J. Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017 / G. J. Van Oldenborgh, K. Wiel, A. Sebastian, R. Singh [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2017. – Vol. 12, № 12. – P. 124009. – DOI: 10.1088/1748-9326/aa9ef2.
55. Sun, Q. Extreme rainfall (R20mm, RX5 day) in Yangtze-Huai, China, in June – July 2016: the role of ENSO and anthropogenic climate change / Q. Sun, C. Miao // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2018. – Vol. 99, № 1. – P. S102–S106. – DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0091.1.
56. Yuan, X. Do climate change and El Niño increase likelihood of Yangtze river extreme rainfall? / X. Yuan, S. Wang, Z. – Z. Hu // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2018. – Vol. 99, № 1. – P. S113–S117. – DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0089.1.
57. Hope, P. The effect of increasing CO2 on the extreme September 2016 rainfall across southeastern Australia / P. Hope, E. – P. Lim, H. Hendon, G. Wang // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2018. – Vol. 99, № 1. – P. S133–S138. – DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0094.1.
58. Christidis, N. The extremely wet March of 2017 in Peru / N. Christidis, R. A. Betts, P. A. Stott // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2019. – Vol. 100, № 1. – P. S31–S35. – DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0110.1.
59. de Abreu, R. C. Contribution of anthropogenic climate change to April – May 2017 heavy precipitation over the Uruguay river basin / R. C. de Abreu [и др.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2019. – Vol. 100, № 1. – P. S37–S41. – DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0102.1.
60. Rimi, R. H. Risks of pre-monsoon extreme rainfall events of Bangladesh: is anthropogenic climate change playing a role? / R. H. Rimi, K. Haustein, M. R. Allen, E. J. Barbour // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2019. – Vol. 100, № 1. – P. S61–S65.
61. Sun, Y. Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961 / Y. Sun [и др.] // *Bulletin of the American Meteorological*

Society. – 2019. – Vol. 100, № 1. – P. S79–S83. – DOI: 10.1175/BAMS – D – 18 – 0114.1.

62. Winter, J. M. Anthropogenic impacts on the exceptional precipitation of 2018 in the Mid-Atlantic United States / J. M. Winter, H. Huang, E. C. Osterberg, J. S. Mankin // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. S5–S10. – DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0172.1.

63. Zhang, W. Anthropogenic influence on 2018 summer persistent heavy rainfall in central western China / W. Zhang [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. S65–S70. – DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0147.1.

64. Ji, P. Anthropogenic contributions to the 2018 extreme flooding over the upper yellow river basin in China / P. Ji [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. S89–S94. – DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0105.1.

65. Kawase, H. The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming / H. Kawase [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. S109–S114. – DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0173.1.

66. Tozer, C. R. A 1 – day extreme rainfall event in Tasmania: process evaluation and long tail attribution / C. R. Tozer [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. S123–S128. – DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0219.1.

67. Kirchmeier-Young, M. C. Anthropogenic contribution to the rainfall associated with the 2019 Ottawa river flood / M. C. Kirchmeier-Young, H. Wan, X. Zhang // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2021. – Vol. 102, № 1. – P. S33–S38. – DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0191.1.

68. Li, R. Anthropogenic influences on heavy precipitation during the 2019 extremely wet rainy season in southern China / R. Li [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2021. – Vol. 102, № 1. – P. S103–S109. – DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0135.1.

69. Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021 [Электронный ресурс] / F. Kreienkamp [et al.]. – World Weather Attribution, 2021. – URL: <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/> (дата обращения: 24.05.2025).
70. Koirala, S. Global assessment of agreement among streamflow projections using CMIP5 model outputs / S. Koirala, Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Kanae // Environmental Research Letters. – 2014. – Vol. 9, № 6. – Art. 064017. – DOI: 10.1088/1748-9326/9/6/064017.
71. Brazil Floods: São Paulo State Devastated [Электронный ресурс] // BBC News. – 2023. – URL: <https://www.bbc.com/news> (дата обращения: 24.05.2025).
72. Arnell, N. W. The impacts of climate change across the globe: a multi-sectoral assessment / N. W. Arnell [и др.] // Climatic Change. – 2016. – Vol. 134, № 3. – P. 457–474. – DOI: 10.1007/s10584-014-1281-2.
73. Tanoue, M. Residual flood damage under intensive adaptation / M. Tanoue, R. Taguchi, H. Alifu, Y. Hirabayashi // Nature Climate Change. – 2021. – Vol. 11. – P. 823–826. – DOI: 10.1038/s41558-021-01158-8.
74. Climate and Weather Extremes in 2022 Show Need for More Action [Электронный ресурс] // World Meteorological Organization (WMO). – 2023. – URL: <https://public.wmo.int/media/news/climate-and-weather-extremes-2022-show-need-more-action> (дата обращения: 24.05.2025).
75. IGAD Climate Adaptation Strategy 2023–2030 [Электронный ресурс] // Intergovernmental Authority on Development (IGAD). – 2023. – URL: <https://igad.int/wp-content/uploads/2023/12/IGAD-Climate-Adaptation-Strategy-2023-2030.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).
76. Project Performance Evaluation Report: Adaptation Finance in Asia and the Pacific [Электронный ресурс] // Asian Development Bank (ADB). – 2022. – URL: <https://www.adb.org/sites/default/files/project-documents/53368/53368-001-pp-en.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

77. Цивин, М. Н. Гидрометрия: теория и практика измерения скорости течения воды в открытых каналах / М. Н. Цивин, П. И. Абраменко. – Киев: ИГиМ, 2003. – 109 с.

78. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2018 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. – 344 с.

79. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2009 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. – 240 с.

80. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2010 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 299 с.

81. Гостева, И. И. Наводнения в России: оперативные данные МЧС о затоплениях за 2013 – 2020 гг. [Электронный ресурс] : [набор данных] / И. И. Гостева, А. Е. Румянцева ; МЧС России. – Версия 1.0. – М., 2021. – URL: <http://www.data-in.ru/data-catalog/datasets/174/> (дата обращения: 12.03.2023).

82. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2013 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2014. – 344 с.

83. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2014 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – 350 с.

84. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2015 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 390 с.

85. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2016 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 360 с.

86. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. – 376 с.

87. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. – 259 с.

88. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. – 264 с.

89. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : Академия гражданской защиты МЧС России, 2022. – 250 с.

90. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году: государственный доклад. – М. : МЧС России : Академия гражданской защиты МЧС России, 2023. – 351 с.

91. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году: государственный доклад. – М. : МЧС Медиа, 2025. – 272 с.

92. Гарнага, В. В. Современные методы борьбы с наводнениями на примере Голландии, Китая, Японии и России / В. В. Гарнага, В. И. Лучкова // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. Т. 2. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2014. – С.60 – 66.

93. Юлдашева, К. А. Борьба с паводками: обзор мирового опыта / К. А. Юлдашева // Информационный сборник НИЦ МКВК. – 2010. – № 2 (33). – С. 1–8.

94. Vrijling, J. K. Risk of flooding and insurance in the Netherlands / J. K. Vrijling [et al.] // Flood Defence'2002: Proceedings of the Second International Symposium on Flood Defence. Vol. II. – Beijing, China : IAHR, 2002. – P. 146–154.

95. Барьер Темзы [Электронный ресурс] // About Britain : сайт. – URL: <http://about-britain.ru/london/dostoprimechatelnosti/barer-temzy/> (дата обращения: 29.10.2022).
96. Bruton, E. The Thames Barrier: a guardian of the river and a product of mathematics [Электронный ресурс] / E. Bruton // The Science Museum. – 2017. – 8 May. – URL: <https://blog.sciencemuseum.org.uk/thames-barrier-guardian-river-product-mathematics/> (дата обращения: 24.05.2025).
97. Матренин, Д. Д. Анализ применимости мирового опыта борьбы с наводнениями для Российской Федерации / Д. Д. Матренин, Г. И. Кашин, Я. А. Олехнович // Неделя науки ИСИ. – 2021. – С. 81–83.
98. Boisvert, P. Crisis and emergency management: A guide for managers of the Public Service of Canada / P. Boisvert, R. Moore. – Ottawa : Canadian Centre for Management Development, 2003. – 145 p.
99. Орцухаева, З. Ш. Анализ мирового опыта борьбы с наводнениями / З. Ш. Орцухаева, Л. И. Магомадова // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». Ч. 2. – СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2019. – С. 98–106.
100. Federal Emergency Management Agency. About FEMA [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fema.gov/about/history.shtm> (дата обращения: 03.09.2022).
101. Wood, M. Flood Risk Management: US Army Corps of Engineers and Layperson Perceptions / M. Wood, D. Kovacs, A. Bostrom, T. Bridges // Risk Analysis. – 2012. – Vol. 32, № 8. – P. 1349–1368. – DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01832.x.
102. Chan, F. Mitigating flood impacts on road infrastructure and transportation by using multiple information sources / F. Chan, H. K. Chan, W. Chen // Resources, Conservation and Recycling. – 2024. – Vol. 205. – Art. 107607. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107607.
103. Киршев, М. Ф. Роль нормативно-правовой базы федерального значения для разработки документации по планировке территории / М. Ф. Киршев,

В. И. Лучкова // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. Т. 1. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2011. – С. 50–55.

104. Корнеев, К. В. Проблемы наводнений, как гидрологических стихийных явлений и способы их решений / К. В. Корнеев, С. Д. Скачкова, А. Х. Авгуцевич // Инновационная наука. – 2022. – № 8 – 2. – С. 68–70.

105. Global Active Archive of Large Flood Events [Электронный ресурс] / Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado. – URL: <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html> (дата обращения: 09.02.2022).

106. Schlumberger, J. Developing a framework for the assessment of current and future flood risk in Venice, Italy / J. Schlumberger, C. Ferrarin, S. N. Jonkman [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2022. – Vol. 22. – P. 2381–2400. – DOI: 10.5194/nhess-22-2381-2022.

107. Coz, J. Lessons learnt from recent citizen science initiatives to document floods in France, Argentina and New Zealand / J. Coz, A. Patalano, D. Collins [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2016. – Vol. 7. – Art. 16001. – DOI: 10.1051/e3sconf/20160716001.

108. Improving flood warnings. Final report (WP1a technical report) [Электронный ресурс]. – UK Government, 2021. – 102 p. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602e6c2de90e0766088116cb/Improving_flood_warnings_Final_report_WP1a_technical_report.pdf (дата обращения: 24.05.2025).

109. Ососова, Н. А. Современная аварийно-спасательная техника / Н. А. Ососова ; науч. рук. Н. Ю. Луговцова // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 232–236.

110. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / С. В. Белов, В. А. Девисилов, А. В. Ильницкая [и др.] ; под ред. С. В. Белова. – 8-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2009. – 615 с.

111. Филатов, С. С. Оценка обстановки при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / С. С. Филатов, М. Б. Старостенко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2021. – № 2. – С. 356–360.

112. Крепша, Н. В. Защита населения и территорий Томска от затоплений паводковыми водами / Н. В. Крепша, Ю. А. Ткаченко, Д. В. Власова // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 236–239.

113. Седнев, В. А. Алгоритм управления силами и средствами при оборудовании инженерных сооружений для защиты и эвакуации населения в зонах возможного катастрофического затопления / В. А. Седнев, А. В. Седнев, В. Я. Трофимец // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 1. – С. 83–92.

114. Седнев, В. А. Теоретические основы обоснования требований к физической стойкости гидротехнических сооружений и других объектов энергетики при внешнем динамическом воздействии / В. А. Седнев, С. Л. Копнышев // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2018. – № 6. – С. 43–62.

115. Седнев, В. А. Инженерно-технические мероприятия по подготовке электроэнергетических сооружений и систем к устойчивому функционированию / В. А. Седнев // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 1. – С. 139–150.

116. Авакян, А. Б. Природные и антропогенные причины наводнений / А. Б. Авакян, М. Н. Истомина // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2001. – № 9. – С. 22–27.

117. Занько, Н. Г. Безопасность жизнедеятельности : учебник / Н. Г. Занько, К. Р. Малаян, О. Н. Русак. – СПб. : Лань, 2021. – 704 с.

118. Зуев, А. О. Организация проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. №1 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-provedeniya-avariyno-spasatelnyh-i-drugih-neotlozhnyh-rabot> (дата обращения: 28.09.2024).

119. Тараканов, Н. Д. Применение технических средств для выполнения инженерно-спасательных работ: Теория и практика / Н. Д. Тараканов. – М. : Атомиздат, 1979. – 206 с.

120. Глотов, М. С. Условия использования автомобилей многоцелевого назначения и требования, предъявляемые к ним на современном этапе, в части преодоления водных преград / М. С. Глотов, Р. В. Могутов, М. С. Колесников // Современные научно-практические решения XXI века. – 2016. – С. 119–124.

121. Кальчугин, А. О. Применение дорожной техники при проведении аварийно-спасательных работ // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 22-24 ноября 2018 г. – Томск, 2018. – 2018. – С. 133 – 137.

122. Масаев, В. Н. Аварийно-спасательная техника для проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на малообъемных и рассредоточенных объектах / В. Н. Масаев, А. Н. Минкин, И. Ю. Сергеев // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2018. – № 1. – С. 23–26.

123. Шатов, С. В. Технология ведения работ при ликвидации последствий стихийных бедствий с использованием погрузчиков / С. В. Шатов, Л. А. Хмара // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2007. – № 38. – С. 145–150.

124. Якутова, В. А. Анализ этапов развития пожарной техники / В. А. Якутова, В. В. Мельникова // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической

конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Т. 2. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 289–291.

125. Чверткин, А. Г. Повышение эффективности проведения аварийно-спасательных работ в зоне затопления / А. Г. Чверткин // Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития. – 2016. – С. 56–74.

126. Магдина, Е. Р. Особенности применения экскаваторов-погрузчиков для выполнения неотложных и восстановительных работ в зонах затопления / Е. Р. Магдина // Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации : сборник статей международной научно-практической конференции, Симферополь, 22 октября 2024 года : в 2 частях. – Симферополь : Ариал, 2025. – С. 125 – 133.

127. Способы и средства оборудования переправ [Электронный ресурс] // Pandia.ru : энциклоп. – URL: <https://pandia.ru/text/77/211/89971.php> (дата обращения: 03.09.2022).

128. Римова, Л. З. Разработка симуляционного приложения для моделирования разрушений от наводнений с многофакторным учетом / Л. З. Римова, В. В. Кугуракова, Р. С. Якушев // Электронные библиотеки. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 238–250.

129. Организация и ведение аварийно-спасательных работ: учебник / В. А. Зокоев, К. М. Иванов, А. А. Горбунов [и др.] ; под ред. Э. Н. Чижикова. – СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2016. – 488 с.

130. Редькин, М. Г. Плавающие колесные и гусеничные машины / М. Г. Редькин. – М. : Воениздат, 1966. – 200 с.

131. Ejsmont, J. Influence of road wetness on tire-pavement rolling resistance / J. Ejsmont, B. Świczko-Żurek, W. Owczarzak, P. Ryś // Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – Vol. 9, № 11. – P. 1302–1310. – DOI: 10.17265/1934-7359/2015.11.006.

132. Иванов, Н. А. Преодоление водных препятствий легким колесным вездеходом / Н. А. Иванов, К. А. Харченко // Ученые заметки ТОГУ. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 48–53.

133. Баулов, Н. Л. Установка и оптимизация оборудования для преодоления водных преград на автомобиль Урал-432009 / Н. Л. Баулов, Р. В. Стрельцов // Актуальные вопросы совершенствования системы технического обеспечения. – 2017. – С. 12–18.

134. Баулов, Н. Л. Анализ системы определения глубины брода wade sensing для преодоления водных преград на автомобиль Урал-432009 / Н. Л. Баулов [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования военной и специальной техники. – 2017. – С. 18–23.

135. Евтюков, С. А. Экспертиза ДТП: методы и технологии / С. А. Евтюков, Я. В. Васильев. – СПб. : СПбГАСУ, 2012. – С. 30–32.

136. Павловский, В. А. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы / В. А. Павловский, Д. В. Никущенко. – СПб. : Лань, 2018. – 368 с.

137. Волков, К. Н. Лагранжев подход к моделированию турбулентных течений газозвеси в приложении к проблемам внутренней газодинамики РДТТ / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Курова // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах (ICOS – 2008) : шестая Всероссийская конференция. – СПб. : Институт механики УрО РАН, 2008. – С. 320–332.

138. Рахимов, А. Х. Оценка эффективности моделирования двухфазного потока в λ -образном пылезащитном устройстве ГТД / А. Х. Рахимов, А. С. Гишваров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 2(92). – С. 56–61. – DOI: 10.54708/19926502_2021_2529256.

139. Қабдылқақов, Е. А. Применение метода Volume of Fluid для моделирования процесса плавления и перемещения топлива / Е. А. Қабдылқақов, А. С. Сураев // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 3. – С. 3–8. – DOI: 10.52676/1729-7885-2021-3-3-8.

140. Егорова, А. Г. Моделирование явления гидродинамического взаимодействия судов методами CFD / А. Г. Егорова, А. А. Зубова, Д. В. Никущенко // Морской вестник. – 2012. – № S1. – С. 12–14.

141. Никущенко, Д. В. Моделирование гидродинамического взаимодействия при проходе стоящего судна в условиях встречного течения и с учетом волнообразования / Д. В. Никущенко, А. А. Зубова // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – № 3 (29). – С. 68–74.

142. Ха, Н. Т. Х. Моделирование гидродинамического взаимодействия судов на основе методов вычислительной гидродинамики / Н. Т. Х. Ха, Н. Т. Т. Куинг // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 13 (55). – С. 38–41.

143. Редчиц, Д. А. Численное моделирование обтекания турбулентным потоком транспортного средства вблизи экрана / Д. А. Редчиц, С. В. Моисеенко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2016. – № 3 (58). – С. 398–402.

144. Катаева, Л. Ю. Численное и экспериментальное моделирование обтекания тел различной конфигурации / Л. Ю. Катаева, А. А. Ермолаев, Н. Н. Киселева, Д. А. Масленников // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 26–31.

145. Фарапонов, В. В. Расчет аэродинамического коэффициента лобового сопротивления тела в дозвуковых и транзвуковых режимах движения с помощью пакета ANSYS Fluent / В. В. Фарапонов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 845–853.

146. Биматов, В. И. Математическое моделирование обтекания тел на основе программного модуля ANSYS CFX / В. И. Биматов, В. В. Фарапонов, Н. В. Савкина // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6 – 3. – С. 8–10.

147. Чорный, А. Д. Верификация физико-математической модели для расчета аэродинамических характеристик плохообтекаемых тел, движущихся в воздухе при больших числах Маха / А. Д. Чорный, А. Н. Чичко, Ю. В. Жукова [и др.] // Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – № 3. – С. 42–47.

148. Демьянчук, О. В. Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда / О. В. Демьянчук // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – № 16. – С. 64–72.

149. Брутян, М. А. Основы дозвуковой аэродинамики: монография / М. А. Брутян, В. В. Вышинский, С. В. Ляпунов. – М. : Наука, 2021. – 269 с.

150. Босняков, С. М. EWT ЦАГИ как неотъемлемая часть методики эксперимента в аэродинамических трубах / С. М. Босняков // Современные проблемы аэрогазодинамики силовых установок летательных аппаратов: материалы Межотраслевой научно-технической конференции. – Жуковский : ЦАГИ, 2021. – С. 18–19.

151. Нифонтова, Л. С. Методы аэродинамического эксперимента [Электронный ресурс] / Л. С. Нифонтова, И. Е. Чавриков, П. В. Алексеев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12 – 3 (54). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-aerodinamicheskogo-eksperimenta> (дата обращения: 03.03.2025).

152. Бубенчиков, А. А. Установки для аэродинамического эксперимента / А. А. Бубенчиков, Л. С. Нифонтова, И. Е. Чавриков // Молодой ученый. – 2016. – № 22 – 3(126). – С. 11–14.

153. Анучин, И. Е. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик масштабных макетов автомобилей / И. Е. Анучин, В. В. Беляков, Е. И. Егоров // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (103). – С. 130–135.

154. Шардин, А. О. Проектирование и изготовление крупномасштабных моделей самолетов для исследования аэродинамических характеристик в аэродинамической трубе на примере типовой модели пассажирского самолета / А. О. Шардин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1 – 2. – С. 378–381.

155. Карабцев, В. С. Аэродинамика плохообтекаемых тел и возможности ее применения при проектировании грузовых автомобилей. Аналитический обзор / В. С. Карабцев, Д. Х. Валеев // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 4(17). – С. 97–102.

156. Королев, Е. В. Аэродинамическое сопротивление плохо обтекаемых тел / Е. В. Королев, Р. Р. Жамалов // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2, № 1 (2). – С. 61–77.

157. Жамалов, Р. Р. Аэродинамические трубы как инструмент исследования / Р. Р. Жамалов, Е. В. Королев, А. И. Котин // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 12. – С. 54–62.

158. Дорошенко, С. А. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе / С. А. Дорошенко, А. В. Дорошенко, Г. В. Орехов // Вестник МГСУ. – 2012. – № 7. – С. 69–74.

159. Кулекина, А. В. Исследование аэродинамических характеристик подвижного состава электрического транспорта / А. В. Кулекина, В. В. Бирюков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 3(86). – С. 112–116.

160. Мустафаев, И. С. Модификации аэродинамических труб в автомобилестроении и результаты определения компонент воздушного сопротивления [Электронный ресурс] / И. С. Мустафаев, Е. Ф. Чубенко // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2018. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsii-aerodinamicheskikh-trub-v-avtomobilestroenii-i-rezultaty-opredeleniya-komponent-vozdushnogo-soprotivleniya> (дата обращения: 03.03.2025).

161. Магдина, Е. Р. Оценка влияния гидродинамического давления на движение экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд / Е. Р. Магдина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 5(99). – С. 672 – 690.

162. Магдина, Е. Р. Сравнительный анализ методов определения объемного водоизмещения бродоходных транспортно – технологических машин / Е. Р. Магдина // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 3(336). – С. 11 – 19. – DOI 10.14489/hb.2025.03. pp.011-019.

163. Мхитарян, А. М. Аэродинамика: учебник / А. М. Мхитарян. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М. : ЭКОЛИТ, 2012. – 448 с.

164. ГОСТ Р 22.9.24 – 2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Машины аварийно-спасательные. Классификация. Общие технические требования. – Введ. 2015 – 01 – 01. – М. : Стандартинформ, 2014. – IV, 24 с.

165. Issakhov, A. Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method / A. Issakhov, Y. Zhandaulet, A. Nogaeva // International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – Vol. 109. – P. 191–206.

166. Сураев, А. С. Моделирование взаимодействия струи расплава со стальной стенкой / А. С. Сураев, Р. А. Иркимбеков, А. Д. Вурим // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 1. – С. 19–22.

167. Земляк, В. Л. Влияние глубины акватории на характер движения погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости / В. Л. Земляк, В. М. Козин, А. С. Васильев, С. А. Чингалаев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2023. – № 1(403). – С. 48–59. – DOI 10.24937/2542-2324-2023-1-403-48-59.

168. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники / А. М. Молчанов [и др.]. – М. : Изд-во МАИ, 2013. – 260 с.

169. Кривцов, А. В. Изучение влияния качества сетки и моделей турбулентности на результаты CFD-расчета в ANSYS Fluent: электрон. метод. указания к лаб. работам / А. В. Кривцов. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. Ун-т, 2013.

170. Магдина, Е. Р. Определение объемного водоизмещения: обзор методов и сравнительный анализ / Е. Р. Магдина // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : материалы XVI международной конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Кравченко Павла Александровича, Санкт-Петербург, 25–28 сентября 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 88 – 92.

171. Аверичкин, П. А. Перспективный метод экспериментальной оценки лобового сопротивления транспортных средств / П. А. Аверичкин,

В. В. Дорошенко // *Фундаментальные основы механики*. – 2024. – № 13. – С. 45–48. – DOI 10.26160/2542-0127-2024-13-45-48.

172. Магдина, Е. Р. Метод исследования гидродинамических характеристик транспортно-технологических машин в аэродинамической трубе / Е. Р. Магдина, А. О. Кожуховский, В. Н. Добромиров // *Грузовик*. – 2025. – № 5. – С. 7 – 12.

173. Инструкция по эксплуатации экскаватора-погрузчика JCB 4CX [Электронный ресурс]. – URL: <https://autotowers.ru/resources/catalog/files/manual-ekskavator-pogruzchik-jcb-4cx.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

174. Кордон, М. Я. Гидравлика: учебное пособие / М. Я. Кордон, В. И. Симакин, И. Д. Горешник. – Пенза : ПГУ, 2005. – 189 с.

175. Магдина, Е. Р. Создание и применение программного обеспечения по оценке бродопроеходимости транспортных средств в судебных инженерно-технических экспертизах / Е. Р. Магдина // *Актуальные проблемы судебных экспертиз и права в строительстве и на транспорте в условиях информатизации, цифровизации и высокотехнологического развития : материалы межрегиональной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12 декабря 2022 года*. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 152 – 158.

176. Лукашук (Магдина), Е. Р. Особенности проведения автотехнической экспертизы при опрокидывании дорожно-строительных машин, работающих в зонах затопления / Е. Р. Лукашук (Магдина) // *Актуальные проблемы современного строительства : материалы LXXV научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 11–14 октября 2022 года*. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 397 – 406.

177. Магдина, Е. Р. Особенности проведения автотехнической экспертизы дорожно-строительных машин, применяемых в зонах затопления / Е. Р. Магдина // *Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации : сборник материалов XIV международной научно-практической конференции, Москва, 10 мая 2023 года*. – Махачкала : АЛЕФ, 2023. – С. 185 – 190.

178. Плавающий транспортер ПТС-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / под ред. А. И. Алексеева. – М. : Воениздат, 1979. – 486 с.

179. Дидковский, А. А. Перспективы использования вертолетов для транспортировки элементов ракетно-космической техники / А. А. Дидковский, А. В. Золин // Аллея науки. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 508–513.

180. Керосин осветительный КО-25, ТС-1 авиационный [Электронный ресурс] // Кронверк Нефть : сайт. – URL: <https://www.kronwerk.net/topлива/kerosin-ko-25-osvetitelnyy-kerosin-ts-1-aviatsionnyy/> (дата обращения: 22.07.2025).

181. Цены на топливо в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // Driff : сайт. – URL: <https://driff.ru/fuel-dynamics/dt/sankt-peterburg/> (дата обращения: 22.07.2025).

182. Методические рекомендации по планированию, подготовке и проведению эвакуации населения, материальных и культурных ценностей в безопасные районы [Электронный ресурс] : утв. МЧС России 10.02.2021 № 2-4-71-2-11. – URL: https://legalacts.ru/doc/metodicheskie-rekomendatsii-po-planirovaniuu-podgotovke-i-provedeniiu-evakuatsii-naselenija_1/ (дата обращения: 11.08.2025).

183. ГОСТ Р ИСО 8666 – 2012. Суда малые. Основные данные. – Введ. 2013 – 07 – 01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 32 с.

184. ГОСТ 22.0.03 – 2022. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – Введ. 2023 – 03 – 01. – М. : Стандартинформ, 2022. – 16 с.

185. ГОСТ 22.0.03 – 2022 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – Введ. 2023 – 03 – 01. – М. : Стандартинформ, 2022. – 16 с.

186. ГОСТ Р 59483 – 2021 Колесные транспортные средства. Термины и определения. – Введ. 2022 – 07 – 01. – М. : Стандартинформ, 2021. – 20 с.

187. ГОСТ Р 27.102 – 2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Введ. 2022 – 07 – 01. – М. : Стандартинформ, 2021. – 28 с.

188. ТР ТС 018/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 дек. 2011 г. № 877 (ред. от 27.09.2023). – Введ. 2015 – 01 – 01. – М. : Евразийская экономическая комиссия, 2011. – 156 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Тестовая задача по определению коэффициента сопротивления методом однофазного течения

Расчеты выполнены при помощи программного обеспечения ANSYS Fluent, которое реализует численный метод контрольных объемов для интегрирования уравнений Навье-Стокса, описывающих механику жидкости и газа. Данный расчет был проведен для отладки расчета однофазного течения и для определения максимально возможного верхнего предела значений коэффициентов сопротивления. На подготовительном этапе расчета в модуле ANSYS Fluent Design Modeler был создан параллелепипед, размеры которого равны габаритам ТТМ: $L = 5,91\text{ м}$; $H = 3,03\text{ м}$; $B = 2,22\text{ м}$ (рисунок А.1).

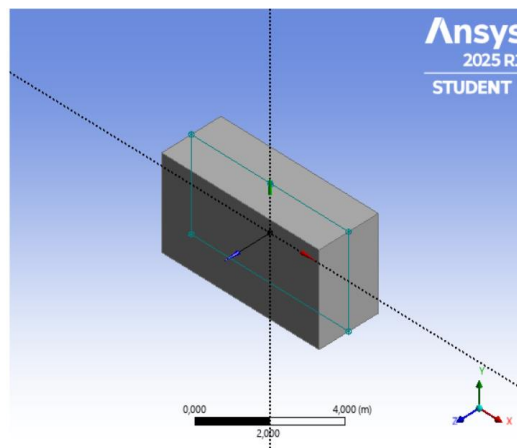


Рисунок А.1 – Параллелепипед с габаритными размерами исследуемой ТТМ в модуле ANSYS Fluent Design Modeler

В ходе расчетов течения жидкости и газа необходимо построение геометрии самого объема жидкости и/или газа, а не обтекаемого тела. При этом твердое тело представляется в виде «полости» в этом жидком объеме. Параллелепипед размещен в условном канале с габаритными размерами $L_k = 10\text{ м}$; $H_k = 7\text{ м}$; $B_k = 6\text{ м}$ (рисунок А.2).

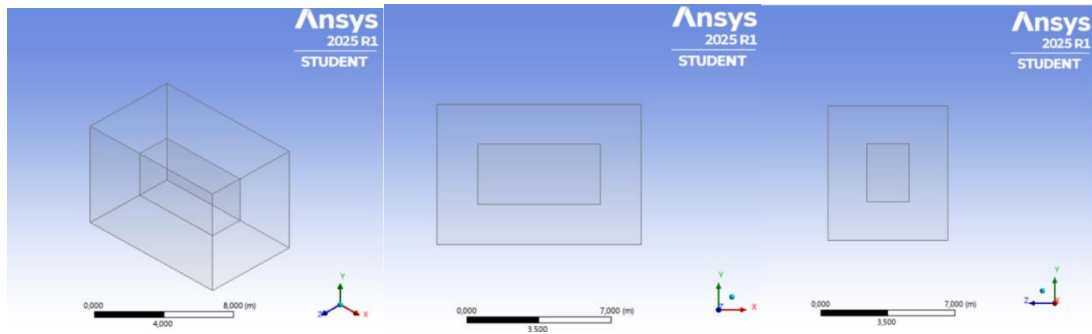


Рисунок А.2 – Параллелепипед в условном канале с габаритными размерами

$L_k=10$ м; $H_k=7$ м; $B_k=6$ м в модуле ANSYS Fluent Design Modeler:

а) аксонометрия; б) продольная поверхность; в) лобовая поверхность

В модуле ANSYS Meshing произведено построение сетки с уменьшением размера в области параллелепипеда. Размерность сетки составила в зоне параллелепипеда – 0,05 м, в остальной области – 0,25 м. Общее количество ячеек составило – 1038544 (рисунок А.3). Входной границе (Inlet) присваивалось граничное условие – velocity inlet. Выходной границе (Outlet) присваивалось граничное условие – pressure outlet. Остальным границам (Wall) присваивалось граничное условие – solid.

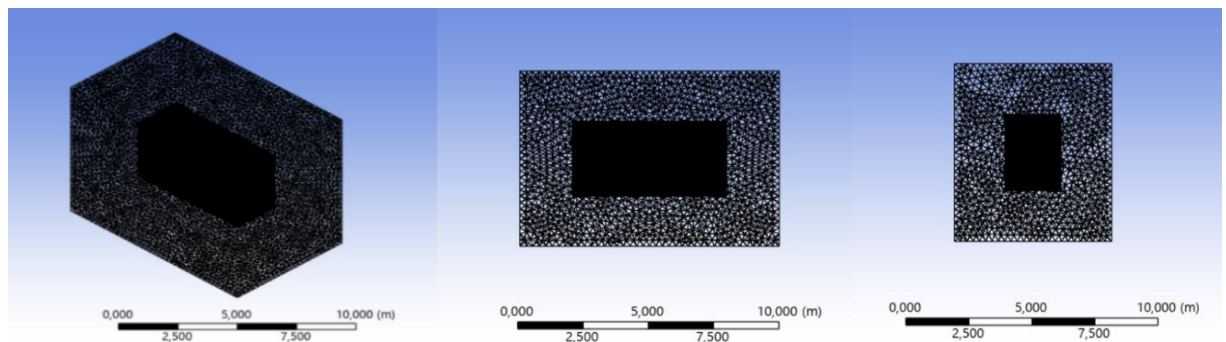


Рисунок А.3 – Сеточная структура в модуле ANSYS Meshing:

а) аксонометрия; б) продольная поверхность; в) лобовая поверхность.

На первом этапе расчета задача решалась в классической аэродинамической постановке – обтекание тела газом с заданной скоростью. В качестве рабочей среды использован воздух с плотностью $\rho = 1,225 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и динамической вязкостью $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$.

Расчет произведен в стационарной постановке методом установления псевдостационарной постановки PseudoTransient с подключением однофазной модели. Для моделирования турбулентности использовалась модель k-ε Standart, схема решателя Pressure-Based Coupled. Параметр, отвечающий за величину шага по времени (Pseudo Time Step) принимался равным 1.

Скорости движения среды задавались согласно таблице 2.9 (см. Глава 2).

При поиске решений в графическом окне отображается график невязок (Residuals) по количеству решаемых уравнений. После завершения требуемого числа итераций и достижения установленного минимального значения невязок (0,001), решение считается сошедшимся. Расчет также необходимо проводить до линеаризации невязок.

Для решения задачи с выходом на режим установления потребовалось около 200 итераций для каждого расчетного случая.

Сходимость расчета определялась по трем основным критериям.

1. При проведении расчета контролировалось значение невязок для каждого уравнения. При достижении всех невязок значения меньшего, чем 10^{-3} , считалось, что итерационный процесс сошелся (рисунок А.4).

2. Контролировались графики основных ключевых характеристик – коэффициент сопротивления и сила сопротивления. Значения стали постоянными после 100 итераций (рисунки А.5 – А.6).

3. Контроль условий глобальных балансов – количество среды (воздуха) на входе должно соответствовать количеству среды на выходе (рисунки А.7 – А.8).

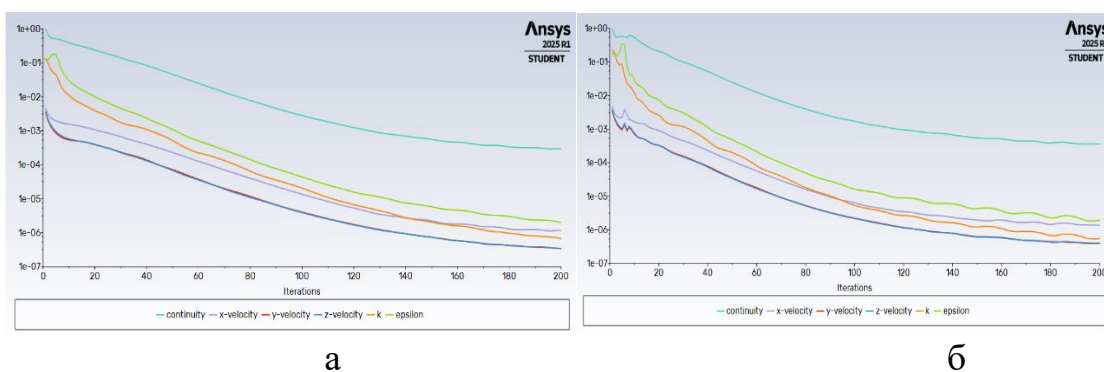
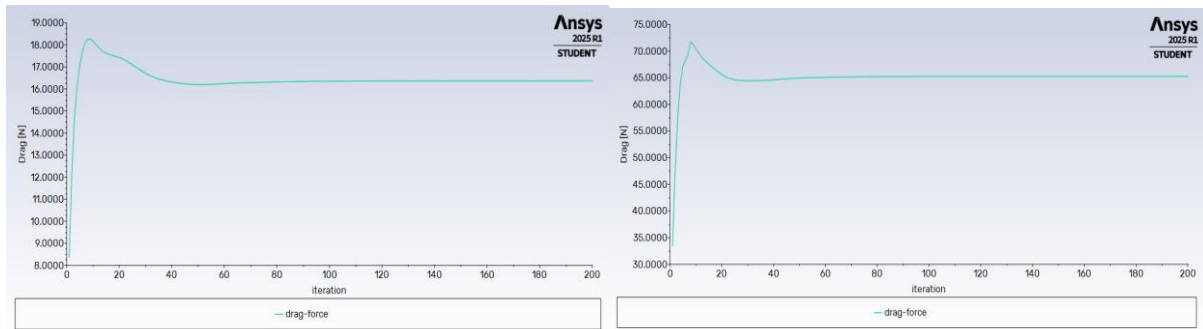


Рисунок А.4 – Невязки в случае обтекания параллелепипеда воздухом со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

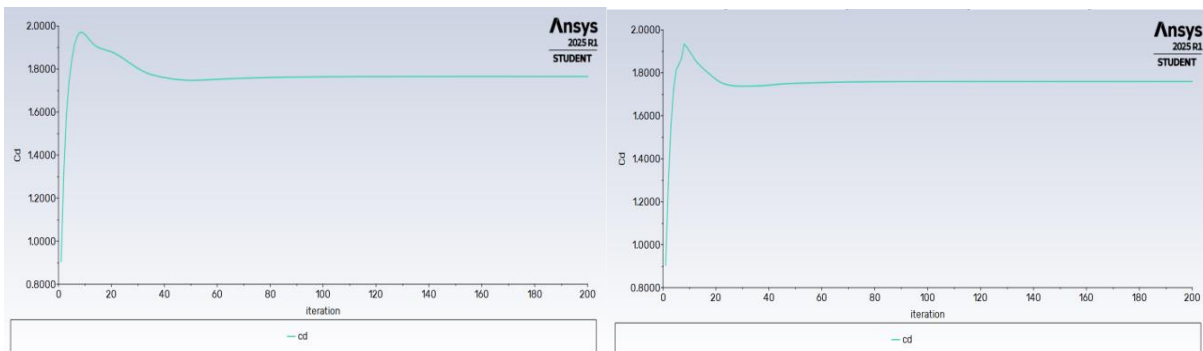
Все невязки достигли значения меньшего, чем установленное 10^{-3} , значит по критерию невязок расчетный процесс сошелся.



а

б

Рисунок А.5 – Сила сопротивления при обтекании параллелепипеда воздухом со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с



а

б

Рисунок А.6 – Коэффициент сопротивления при обтекании параллелепипеда воздухом со скоростью а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Значения силы сопротивления и коэффициента сопротивления приблизительно на 50 итерации приняли свои постоянные значения, что также свидетельствует о сошедшемся решении.

Разность в расходе воздуха на входе и выходе в расчетную область составила $-1,5258 \cdot 10^{-5}$, что меньше 0,00001%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся (рисунок А.7).

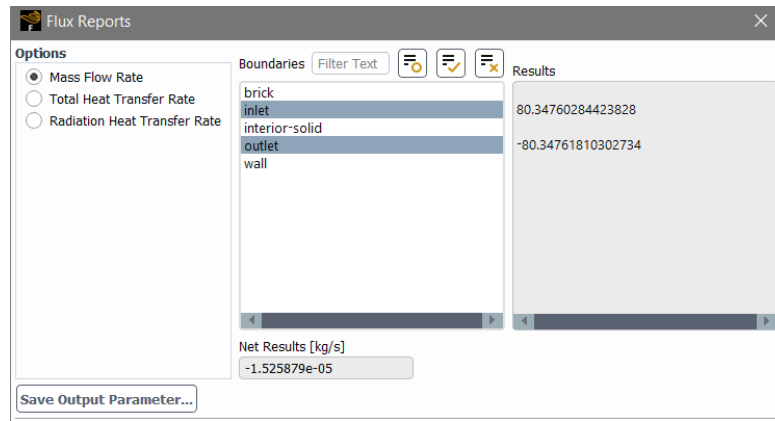


Рисунок А.7 – Массовый расход воздуха на входе и выходе из канала при обтекании параллелепипеда воздухом со скоростью 1,5 м/с

Разность в расходе воздуха на входе и выходе в расчетную область составила – 0,0001373, что меньше 0,022%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся (рисунок А.8).

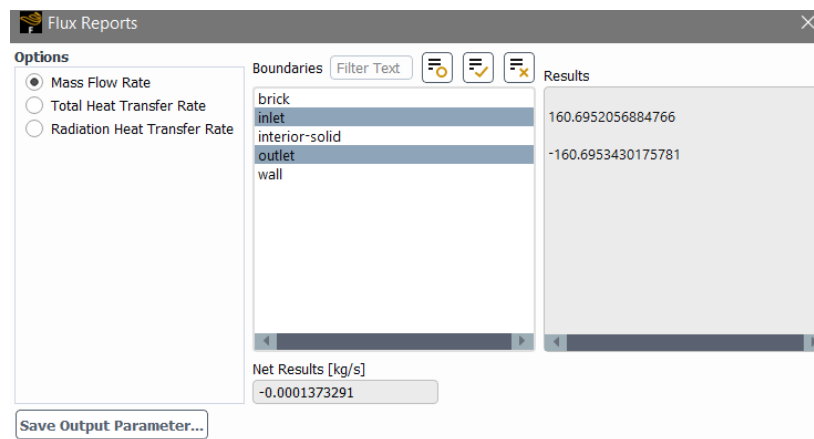


Рисунок А.8 – Массовый расход воздуха на входе и выходе из канала при обдуве параллелепипеда воздухом со скоростью 3 м/с

Итоговые результаты расчета представлены на рисунках А.9 – А.10.

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
	Pressure	Pressure
brick	16.233017	1.7471071

Net	16.233017	1.7471071

Рисунок А.9 – Результаты расчета при обтекании параллелепипеда воздухом со скоростью 1,5 м/с

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
brick	64.783401	1.7511164

Net	64.783401	1.7511164

Рисунок А.10 – Результаты расчета при обтекании параллелепипеда воздухом со скоростью 3 м/с

Распределение давления воздуха на лобовую поверхность параллелепипеда представлено на рисунке А.11.

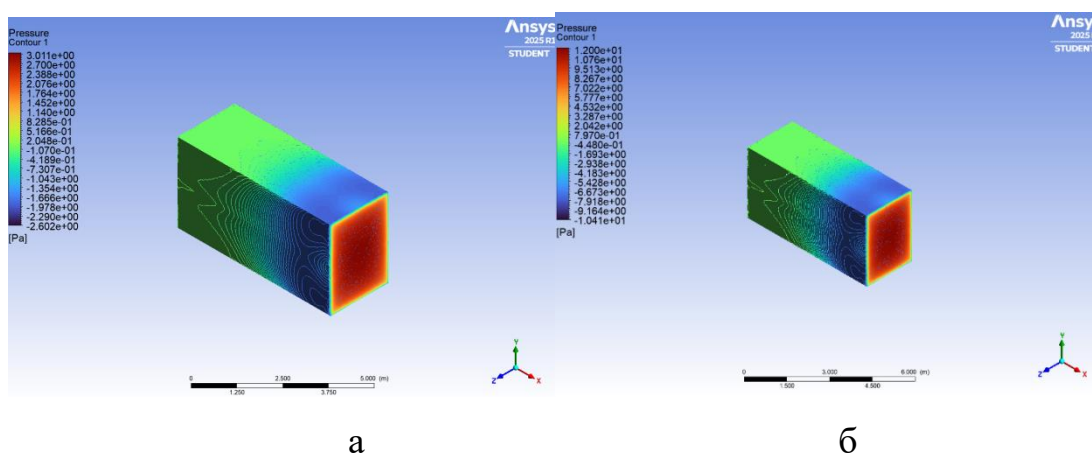


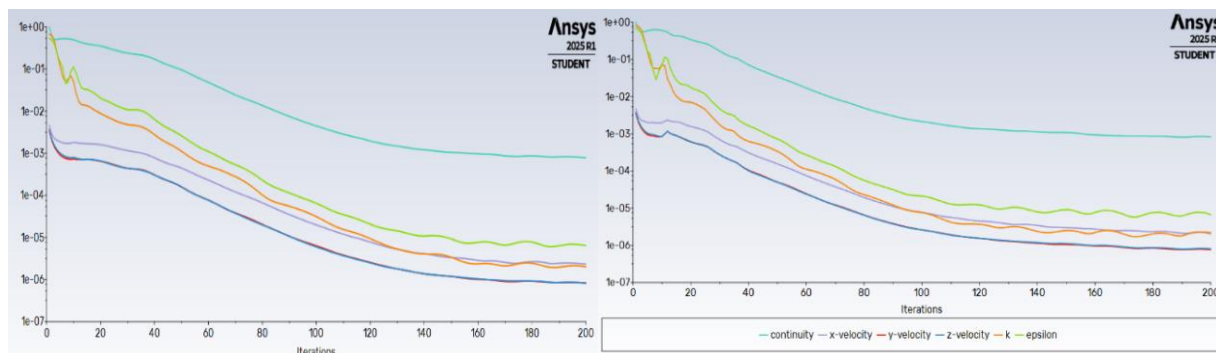
Рисунок А.11 – Распределение давления воздуха на лобовую поверхность параллелепипеда при скоростях обдува: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Таким образом, коэффициент сопротивления для параллелепипеда при скорости 1,5 м/с составил 1,7471, а при скорости обдува 3 м/с – 1,7511. Отличие значений друг от друга составляет 0,23%. Соответственно, можно сделать вывод о том, что коэффициент сопротивления воздуха для диапазона малых скоростей 1,5 – 3 м/с будет практически одинаковыми.

По теории гидродинамики коэффициент сопротивления не зависит от плотности среды, соответственно, значения коэффициента сопротивления параллелепипеда в водной и воздушной среде должны быть идентичны.

Аналогичное исследование проведено для рабочей среды – вода, с плотностью $\rho = 998,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и динамической вязкостью $\mu = 0,001003 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$.

Результаты невязок для тестового расчета с рабочей средой – вода представлены на рисунке А.12.



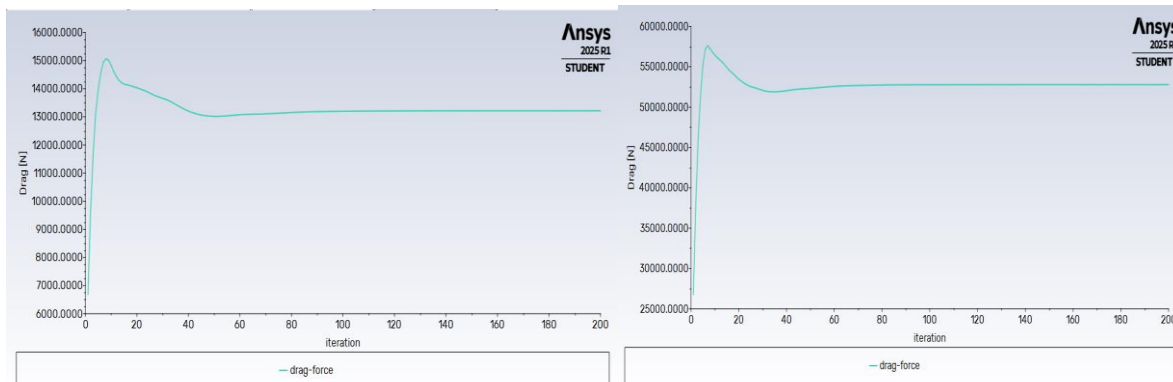
а

б

Рисунок А.12 – Невязки в случае обтекания параллелепипеда водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Все невязки достигли значения меньшего, чем установленное 10^{-3} , значит по критерию невязок расчетный процесс сошелся.

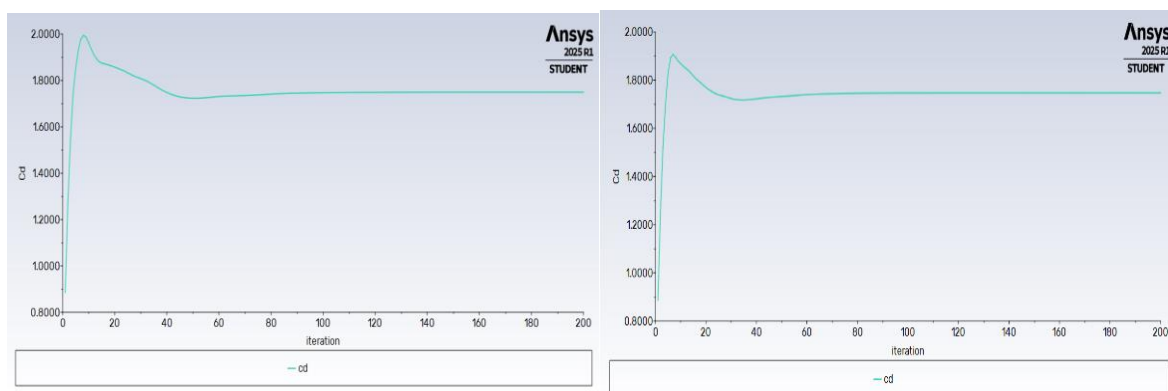
Результаты контролируемых параметры при обтекании водой представлены на рисунках А.13 – А.14.



а

б

Рисунок А.13 – Сила сопротивления при обтекании параллелепипеда водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с



а

б

Рисунок А.14 – Коэффициент сопротивления при обтекании параллелепипеда водой со скоростями: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Значения силы сопротивления и коэффициента сопротивления приблизительно на 50 итерации приняли свои постоянные значения, что также свидетельствует о сошедшемся решении.

Значения массового расхода воды на входе и выходе из расчетной зоны представлены на рисунках А.15 – А.16.

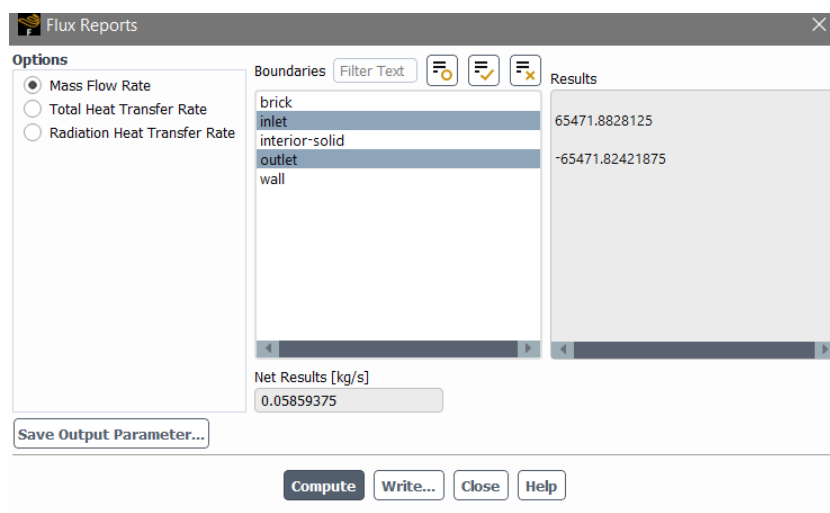


Рисунок А.15 – Массовый расход воды на входе и выходе из канала при обтекании параллелепипеда водой со скоростью 1,5 м/с

Разность в расходе воды на входе и выходе в расчетную область составила 0,0585, что меньше 0,00009%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся.

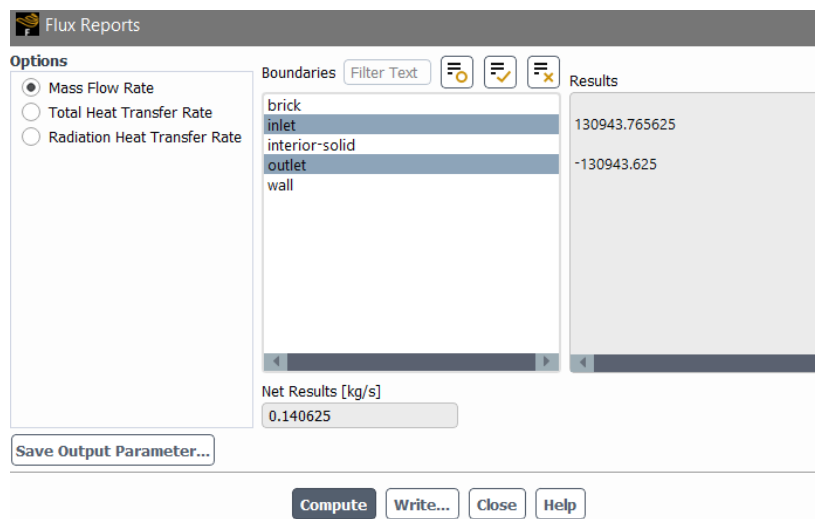


Рисунок А.16 – Массовый расход воды на входе и выходе из канала при обтекании параллелепипеда водой со скоростью 3 м/с

Разность в расходе воды на входе и выходе в расчетную область составила 0,0585, что меньше 0,0001%. Следовательно, по критерию массового баланса расчетная задача также является сошедшейся.

Результаты расчета представлены на рисунках А.17 – А.18.

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
brick	13141.238	1.7396849
Net	13141.238	1.7396849

Рисунок А.17 – Результаты расчета при обтекании параллелепипеда водой со скоростью 1,5 м/с

Forces - Direction Vector (-1 0 0)		
Zone	Forces [N]	Coefficients
brick	52507.957	1.7377985
Net	52507.957	1.7377985

Рисунок А.18 – Результаты расчета при обтекании параллелепипеда водой со скоростью 3 м/с

Распределение давления воды на лобовую поверхность параллелепипеда представлено на рисунке А.19.

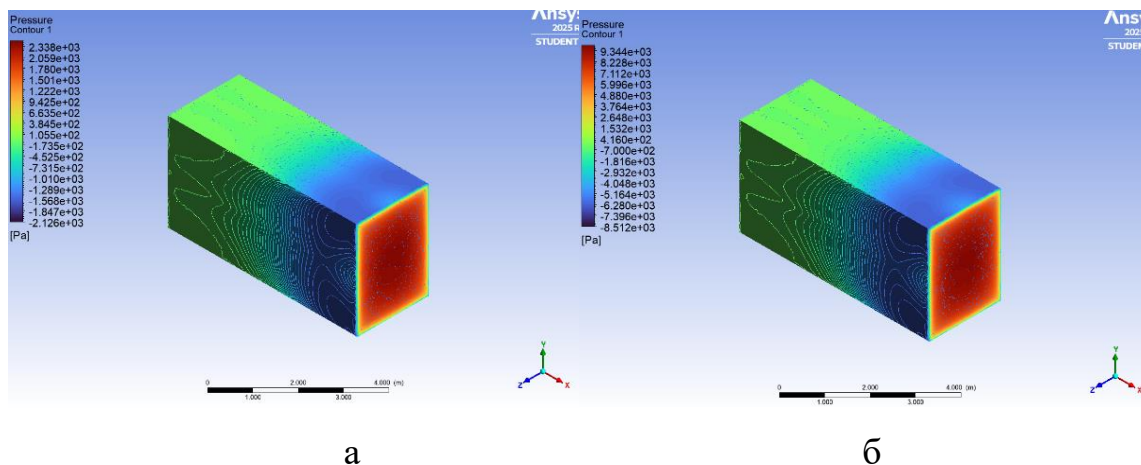


Рисунок А.19 – Распределение давления воды на лобовую поверхность параллелепипеда при скоростях обтекания: а) 1,5 м/с; б) 3 м/с

Коэффициент сопротивления для параллелепипеда при скорости 1,5 м/с составил 1,7397, а при скорости обдува 3 м/с – 1,7377. Отличие значений друг от друга составляет 0,115%. Соответственно, можно сделать вывод о том, что коэффициент сопротивления в воде, как и в воздухе, для диапазона малых скоростей 1,5 – 3 м/с будет практически одинаковыми.

Таким образом, решение тестовой задачи позволило установить: расчет однофазного течения производится корректно с учетом всех критериев сходимости; значения коэффициентов сопротивления в воздушной и водной средах одинаковы, что позволяет проводить их экспериментальное определение в аэродинамической трубе; предел значения лобового коэффициента сопротивления параллелепипеда с габаритами исследуемой ТТМ – 1,74. Следовательно, можно предположить, что коэффициент лобового сопротивления ТТМ должен быть меньше установленного.

В связи с изложенным численное моделирование движения машины вброд целесообразно проводить только при обтекании водной средой.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты аэродинамического эксперимента

Результаты аэродинамического эксперимента представлены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Результаты аэродинамического эксперимента

Уровень погружения – 1,5 м				
Gamma	X	Y	M_z	V_0 , м/с
0°	– 127,668	– 6,82928	– 28,6065	24,43119
30°	– 233,53	62,16634	– 551,365	24,04981
60°	– 323,742	95,62591	– 539,239	23,73674
270°	– 328,467	– 33,6872	42,95152	23,50344
240°	– 295,333	104,5353	– 547,058	23,58663
150°	– 230,31	– 146,013	918,4617	24,24353
180°	– 91,8854	– 8,13014	46,30896	24,62102
Уровень погружения – 1,2 м				
Gamma	X	Y	M_z	V_0 , м/с
360°	– 98,6346	3,854195	– 18,9669	24,60594
330°	– 195,945	– 57,3198	666,5697	24,47571
300°	– 254,501	– 84,3003	712,7163	23,78816
270°	– 262,234	– 14,7976	212,441	23,91021
240°	– 254,694	96,43802	– 276,833	23,88206
210°	– 169,215	97,42076	– 638,97	24,24978
180°	– 71,095	0,965636	3,142492	24,69556

Уровень погружения – 0,9 м				
Гамма	X	Y	M _z	V ₀ , м/с
0°	– 69,0303	– 4,89045	– 0,87031	24,5307
30°	– 138,881	38,02418	– 511,99	24,4078
60°	– 192,467	39,87296	– 589,479	24,43639
90°	– 196,189	– 5,01147	– 261,459	24,24708
120°	– 191,023	– 70,7864	127,2592	24,33392
150°	– 126,578	– 72,6562	324,6797	24,59993
180°	– 53,2287	– 6,22	– 6,4656	24,64053
Уровень погружения – 0,6 м				
Гамма	X	Y	M _z	V ₀ , м/с
360°	– 49,7967	– 4,62925	2,896834	24,92515
330°	– 50,8185	– 0,97108	– 12,3569	24,72071
300°	– 95,4743	– 38,5687	392,2878	24,71819
270°	– 113,152	– 21,1412	346,6266	24,4517
240°	– 128,396	– 1,52533	133,7803	24,43713
210°	– 133,185	23,34809	– 25,9598	24,59685
180°	– 91,2124	30,87181	– 125,056	24,77345

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты статистического анализа значений коэффициента бокового сопротивления и коэффициента момента рысканья

В таблице В.1 приведена зависимость коэффициента бокового сопротивления C_y от угла набегания β потока для каждой глубины.

Таблица В.1 – Зависимость коэффициента бокового сопротивления C_y от угла набегания потока для каждой глубины

Глубина, $h_{бр}$	Пирсон (r)	Спирмен (ρ)	Интерпретация
0,6	0,85	0,89	Сильная положительная связь
0,9	0,91	0,93	Сильная положительная связь
1,2	0,94	0,96	Сильная положительная связь
1,5	0,78	0,82	Сильная положительная связь

Коэффициент бокового сопротивления C_y растет с увеличением угла для всех глубин, достигая максимума при $90 - 120^\circ$. Наибольшая корреляция наблюдается при $h = 1,2$ ($r = 0,9$), наименьшая — при $h = 1,5$ ($r = 0,78$). Разница между r и ρ указывает на нелинейность (квадратичный тренд).

В таблице В.2 представлена зависимость коэффициента бокового сопротивления C_y от глубины водной преграды для каждого угла набегания потока.

Таблица В.2 – Зависимость коэффициента бокового сопротивления C_y от глубины водной преграды для каждого угла набегания потока

Угол набегания потока, β	Пирсон (r)	Спирмен (ρ)	Интерпретация
0°	0,12	0,18	Слабая связь
30°	0,95	0,98	Сильная положительная связь

60°	0,98	1,0	Сильная положительная связь
90°	0,99	1,0	Сильная положительная связь
120°	0,92	0,95	Сильная положительная связь
150°	-0,88	-0,93	Сильная отрицательная связь
180°	-0,65	-0,71	Умеренная отрицательная связь

При углах 30 – 120° коэффициент бокового сопротивления C_y растет с глубиной ($r = 0,92 - 0,99$). При углах 150 – 180° коэффициент бокового сопротивления C_y падает с глубиной ($r = -0,88 - 0,65$). При угле 0° – связь слабая ($r = 0,12$).

Матрица корреляций для всех параметров представлена в таблице В.3.

Таблица В.3 – Матрица корреляций для всех параметров

Параметры	Угол набегания потока, β	Глубина, $h_{бр}$	Коэффициент лобового сопротивления, C_x
Угол набегания потока, β	1,0	0,03	0,88
Глубина, $h_{бр}$	0,03	1,0	0,15
Коэффициент бокового сопротивления, C_y	0,88	0,72	1,0

Коэффициент бокового сопротивления C_y сильнее всего связан с углом ($r = 0,88$). Глубина усиливает положительное влияние угла при 30 – 120°, но ослабляет при 150 – 180°.

В таблице В.4 представлен дисперсионный анализ для оценки значимости факторов.

Таблица В.4 – Дисперсионный анализ для оценки значимости факторов

Параметр	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F – значение	p – value
Угол набегания потока, β	12,874	6	2,146	245,8	<0,001
Глубина, $h_{бр}$	8,932	3	2,977	341,1	<0,001
Взаимодействие (угол и глубина)	4,215	18	0,234	26,8	<0,001
Квадратичные члены	1,563	2	0,781	89,5	<0,001
Остаток	0,105	0	–	–	–
Итого	27,689	27	–	–	–

Угол ($p < 0,001$), глубина ($p < 0,001$) и их взаимодействие ($p < 0,001$) сильно значимы. Квадратичные члены ($p < 0,001$) значимы, что подтверждает нелинейность зависимости.

Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2 – го порядка для коэффициента бокового сопротивления C_y представлена в таблице В.5. Зависимость коэффициента момента рысканья C_{mz} от угла набегания потока для каждой глубины представлена в таблице В.6.

Таблица В.5 – Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2 – го порядка

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t – статистика	p – value
b_0	– 0,152	0,018	– 8,44	< 0,001
b_1	1,876	0,075	25,0	< 0,001
b_2	0,023	0,001	23,0	< 0,001
b_{11}	– 0,642	0,030	– 21,4	< 0,001
b_{22}	– 0,0002	0,00001	– 20,0	< 0,001
b_{12}	0,005	0,0002	25,0	< 0001

Таблица В.6 – Зависимость коэффициента момента рысканья C_{mz} от угла набегания потока для каждой глубины

Глубина, $h_{бр}$	Пирсон (r)	Спирмен (ρ)	Интерпретация
0,6	0,45	0,57	Умеренная положительная связь
0,9	0,62	0,71	Сильная положительная связь
1,2	0,68	0,75	Сильная положительная связь
1,5	0,51	0,64	Умеренная положительная связь

Коэффициент момента рысканья C_{mz} положительно коррелирует с углом для всех глубин, достигая максимума при $60 - 90^\circ$. Наибольшая корреляция наблюдается при $h = 1,2$ ($r = 0,68$), наименьшая — при $h = 0,6$ ($r = 0,45$). Разница между r и ρ указывает на нелинейность (пик при $60 - 90^\circ$, спад при $120 - 180^\circ$).

В таблице В.7 представлена зависимость коэффициента момента рысканья C_{mz} от глубины водной преграды для каждого угла набегания воздушного потока.

Таблица В.7 – Зависимость коэффициента момента рысканья C_{mz} от глубины водной преграды для каждого угла набегания потока

Угол набегания потока, β	Пирсон (r)	Спирмен (ρ)	Интерпретация
0°	0,12	0,18	Слабая связь
30°	0,92	0,95	Сильная положительная связь
60°	0,85	0,89	Сильная положительная связь
90°	-0,78	-0,82	Сильная отрицательная связь
120°	-0,95	-0,98	Сильная отрицательная связь
150°	-0,88	-0,93	Сильная отрицательная связь
180°	-0,35	-0,41	Слабая отрицательная связь

При углах $30 - 60^\circ$ коэффициент момента рысканья C_{mz} растет с глубиной ($r = 0,85 - 0,92$). При углах $90 - 150^\circ$ коэффициент момента рысканья C_{mz} падает с глубиной ($r = -0,78 - 0,95$). При угле 0° и 180° связь слабая/незначимая.

Матрица корреляций всех параметров для коэффициента момента рысканья C_{mz} представлена в таблице В.8.

Таблица В.8 – Матрица корреляций для всех параметров

Параметры	Угол набегания потока, β	Глубина, $h_{бр}$	Коэффициент момента рысканья, C_{mz}
Угол набегания потока, β	1,0	0,05	0,58
Глубина, $h_{бр}$	0,05	1,0	0,32
Коэффициент лобового сопротивления, C_x	0,58	0,32	1,0

Коэффициент момента рысканья C_{mz} сильнее всего связан с углом ($r = 0,58$).

Глубина усиливает положительное влияние угла при $30 - 60^\circ$, но ослабляет при $90 - 150^\circ$.

Дисперсионный анализ значимости факторов для коэффициента момента рысканья C_{mz} представлен в таблице В.9.

Таблица В.9 – Дисперсионный анализ для оценки значимости факторов

Параметр	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F – значение	p – value
Угол набегания потока, β	245,32	6	40,89	85,6	< 0,001
Глубина, $h_{бр}$	168,74	3	56,25	117,8	< 0,001

Взаимодействие (угол и глубина)	89,15	18	4,95	10,4	< 0,001
Квадратичные члены	32,47	2	16,23	34,0	< 0,001
Остаток	6,68	0	–	–	–
Итого	541,36	27	–	–	–

Угол ($p < 0,001$), глубина ($p < 0,001$) и их взаимодействие ($p < 0,001$) сильно значимы.

Квадратичные члены ($p < 0,001$) значимы, что подтверждает нелинейность зависимости.

Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2-го порядка коэффициента момента рысканья C_{mz} представлена в таблице В.10.

Таблица В.10 – Оценка коэффициентов уравнения регрессии 2-го порядка коэффициента момента рысканья C_{mz}

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t – статистика	p – value
b_0	– 0,85	0,12	– 7,08	< 0,001
b_1	3,45	0,25	13,8	< 0,001
b_2	0,18	0,01	18,0	< 0,001
b_{11}	– 1,12	0,10	– 11,2	< 0,001
b_{22}	– 0,002	0,0001	– 20,0	< 0,001
b_{12}	– 0,03	0,001	– 30,0	< 0,001

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025668100

**Программа для оценки бродоходимости колесных
транспортно-технологических машин**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет» (RU)*

Авторы: *Добромиров Виктор Николаевич (RU), Магдина
Елизавета Ростиславовна (RU), Кожуховский Алексей
Олегович (RU)*

Заявка № 2025665625

Дата поступления 24 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 июля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

09.09.2025 № 08.32/15/24

[Акт внедрения материалов диссертации
 в учебный процесс]



АКТ

внедрения материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод оценки бродоходности колесных транспортно-технологических машин» Магдиной Елизаветы Ростиславовны, в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Комиссия в составе:

Председателя:

кандидата технических наук, доцента Зыскина А.В. – декана автомобильно-дорожного факультета.

Членов комиссии:

доктора технических наук, профессора Евтюкова С.С. – заведующего кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства;

доктора технических наук, доцента Куракиной Е.В. - заведующего кафедрой наземных транспортно-технологических машин;

кандидата технических наук, доцента Черняева И.О. – заведующего кафедрой технической эксплуатации транспортных средств

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод оценки бродоходности колесных транспортно-технологических машин» Магдиной Елизаветы Ростиславовны (научный руководитель: доктор технических наук, профессор Добромиров Виктор Николаевич), в учебный процесс выпускающей кафедры Наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета в рабочие программы дисциплин «Автотракторный транспорт» и «Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных дорожных средств и оборудования» по направлениям подготовки 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 15.04.03 «Прикладная механика».

Внедрение результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 09 сентября 2025 года (протокол № 01).

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. В разработанной математической модели движения колесной транспортно-технологической машины по дну водной преграды вброд по слабедеформируемому основанию.

2. В разработанных методиках расчетного определения объемного водоизмещения и коэффициентов обтекаемости ТТМ на основе реализации имитационных моделей их взаимодействия с водной средой.

3. В разработанных методиках экспериментального определения на физических моделях ТТМ объемного водоизмещения и коэффициентов обтекаемости машины в аэродинамической трубе.

4. В предложенном метод расчетной оценки бродоходных свойств колесных ТТМ.

Основные положения диссертационного исследования, позволяющие развивать научно-методические подходы к расчетному определению бродоходных свойств и проектированию колесных транспортных средств различной конфигурации, для подготовки специалистов в области автомобильного транспорта, обладающих различными компетенциями, как исполнителя, так и руководителя, изложены в следующих печатных трудах:

1. Лукашук, Е. Р. (Магдина Е.Р.) Условия применения самоходных строительных машин в зонах подтопления рек Арктического региона / Е. Р. Лукашук (Магдина Е.Р.), В. Н. Добромиров // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 18-22.

2. Магдина, Е. Р. Проблемные вопросы применения дорожно-строительных машин в зонах затопления / Е. Р. Магдина, В. Н. Добромиров // Русский инженер. – 2023. – № 3(80). – С. 40-43.

3. Магдина, Е. Р. Оценка влияния гидродинамического давления на движение экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд / Е. Р. Магдина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 5(99). – С. 672-690.

4. Магдина, Е. Р. Метод исследования гидродинамических характеристик транспортно-технологических машин в аэродинамической трубе / Е. Р. Магдина, А. О. Кожуховский, В. Н. Добромиров // Грузовик. – 2025. – № 5. – С. 7-12.

Председатель комиссии:

Декан АДФ, к.т.н., доцент

 Зыскин А.В.

Члены комиссии:

Заведующий кафедрой ТСидМС,
 д.т.н., профессор

 Евтюков С.С.

Заведующий кафедрой НТТМ,
 д.т.н., доцент

 Куракина Е.В.

Заведующий кафедрой ТЭТС,
 к.т.н., доцент

 Черняев И.О.