

*На правах рукописи*



**МАГДИНА Елизавета Ростиславовна**

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

Специальность: 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства  
и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)».

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Добромиров Виктор Николаевич**
- Официальные оппоненты:** **Макаров Владимир Сергеевич**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
кафедра «Строительные и дорожные машины»,  
профессор;
- Зайцев Сергей Викторович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-  
дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)», кафедра «Тягачи  
и амфибийные машины», доцент.
- Ведущая организация:** **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический  
университет им. С.М. Кирова».**

Защита диссертации состоится «18» декабря 2025 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» СПбГАСУ по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория № 220. Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/-personal/magdina-elizaveta-rostislavovna>

Автореферат разослан «20» октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Репин С. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Выполнение аварийно-спасательных работ в зонах наводнений, проведение строительства в условиях неосвоенной местности, обеспечение мобильности инженерно-технических средств силовых структур требует применения техники, приспособленной к движению и работе в условиях воздействия водной среды. Передвижение транспортно-технологических машин (далее – ТТМ) вброд является сложной задачей, требующей тщательного планирования и оценки рисков, связанных с возможностью застревания, повреждения и даже затопления технических устройств. При этом возможности применения ТТМ в зонах затопления изучены недостаточно. Нормативный уровень их бродоходимости, определяемый максимальной глубиной преодолеваемого брода, ограничивается, как правило, работоспособностью элементов конструкции, подвергнутых затоплению. Однако на эксплуатационные возможности машины при движении вброд влияют глубина затопления, скорость течения и выталкивающая сила воды, сцепные свойства движителя. Моделирование воздействия на ТТМ указанных факторов позволяет определить их потенциальную бродоходимость, обусловленную тяговыми возможностями, управляемостью и устойчивостью, обосновать требования к водозащите затопляемых узлов и агрегатов, выявить безопасный уровень гидростатического и гидродинамического воздействия водного потока в конкретных условиях применения машин. Результаты исследования способствуют повышению эффективности применения ТТМ при ликвидации последствий опасных гидрологических явлений в зонах массового проживания населения, что в условиях их ежегодной повторяемости представляется крайне актуальным.

**Степень разработанности темы.** Оценке и научному обоснованию возможностей самостоятельного преодоления водных преград самоходными наземными транспортными средствами посвящено значительное количество разноплановых исследований, выполненных отечественными учеными. Их результаты нашли отражение в трудах П. В. Аксенова, А. С. Антонова, Н. Н. Болгова, А. С. Бондарева, В. Ф. Васильченкова, В. Н. Добромирова, А. С. Емельянчика, С. В. Зайцева, С. С. Зиновьева, В. Н. Зузова, Т. А. Ивахненко, Ю. А. Кононовича, В. И. Ладанова, С. М. Ломако, В. С. Макарова, С. А. Малахова, А. В. Нагорных, М. А. Радченко, А. Сами, О. А. Серякова, К. О. Серякова, В. А. Ткачева и ряда других авторов. В ходе этих исследований прорабатывались вопросы, связанные с научным обоснованием повышения плавучести самоходных машин с различными типами движителей, изучением их входа и выхода из воды, проводилась экспериментально-расчетная оценка бродоходимости многоцелевых автомобилей.

Многочисленные современные зарубежные исследования взаимодействия наземных автотранспортных средств с водной средой связаны в основном с оценкой условий сохранения положения припаркованных легковых автомобилей при затоплении их 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, C. Arrighi, J. C. Alcèrrecа-Huerta, H. Oumeraci, F. Castelli, M. Kramer, K. Terheiden, S. Wierprecht, E. Martinez-Gomariz, M. Gomez, B. Russo, S. Djordjević, M. Pregnolato, A. Ford, S. M. Wilkinson, R. J. Dawson и др.

Анализ трудов ученых показал, что целевые исследования в части преодоления глубоководных бродов самоходными ТТМ на колесной базе в настоящее время носят крайне ограниченный характер, а уровни бродоходимости традиционно устанавливаются исходя из конструктивной возможности функционирования агрегатов и систем таких машин в водной среде и не превышают 0,5 – 0,7 м. Это создает пробел в знаниях, необходимых для разработки рекомендаций по безопасной и эффективной эксплуатации техники в подобных условиях.

**Цель исследования** состоит в разработке метода оценки бродоходимости ТТМ в различных условиях среды затопления, основанного 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 применяемости ТТМ для ликвидации последствий опасных гидрологических явлений 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.
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 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.

**Достоверность результатов исследования** обоснована применением современного математического аппарата и апробированных методик расчета тяговых возможностей колесной машины, реализацией вычислительных методов компьютерного моделирования на базе сертифицированных программных продуктов, корректной оценкой погрешности измерений, высокой сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований.

**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.** Разработанный метод позволяет: устанавливать объективно достижимые уровни бродоходимости колесных ТТМ различного назначения и обосновывать конструктивные требования к разработчикам техники по их реализации; обосновывать рекомендации по практическому применению серийной техники в условиях проведения аварийно-спасательных работ в зонах затоплений при различных глубинах, скоростях течения воды и состояниях донной опорной поверхности.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования представляет собой совокупность теоретических исследований, компьютерного моделирования и экспериментальных методов. Теоретические исследования основаны на классических работах в области теории движения колесных машин. При компьютерном моделировании использованы вычислительные методы моделирования в системах автоматизированного проектирования CAD и вычислительной гидродинамики CFD (КОМПАС-3D, ANSYS Fluent), обеспечившие возможность создания и исследования компьютерных моделей ТТМ в различных условиях воздействия водной среды. Экспериментальные методы включают гидростатические и аэродинамические испытания физических моделей ТТМ, обеспечивающие проверку разработанных компьютерных моделей. При обработке результатов использовались методы математической статистики.

#### **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» по пунктам 1 и 3.

**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.).

**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.

**Во введении** раскрыта актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, обоснованы научная новизна и практическая значимость исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализированы современные проблемы, связанные с повышением проходимости колесных ТТМ при преодолении водных преград, и дана характеристика научных исследований в этой области. Обосновывается необходимость разработки метода комплексной оценки бродоходимости, сочетающего математическое, имитационное моделирование и экспериментальные исследования.

**Во второй главе** разработана математическая модель взаимодействия колесной машины с водной средой и слабдеформируемым донным основанием, учитывающая гидростатические и гидродинамические силы водного потока, сцепные свойства колес и реализуемую силу тяги. Проведен анализ влияния скорости движения ТТМ, глубины и скорости течения водной преграды на устойчивость машины. Разработаны методики расчетной оценки объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления ТТМ на основе реализации имитационных моделей их взаимодействия с водной средой.

**В третьей главе** разработаны методики экспериментальных гидростатических и аэродинамических исследований масштабных моделей колесных ТТМ. Приведены результаты экспериментально-расчетного определения объемного водоизмещения и сил аэродинамического сопротивления машины с последующим вычислением на их основе коэффициентов лобового и бокового гидродинамического сопротивления натурального образца.

**В четвертой главе** представлен метод оценки бродоходимости колесных ТТМ, основанный на интеграции математической модели, методов имитационного моделирования и экспериментальных данных, позволяющий обосновать предельные глубины преодолеваемых водных преград, допустимые при этом скорости движения машины и водного потока. Приводится пример расчета для конкретной модели ТТМ.

**В заключении** представлены основные выводы по результатам исследования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**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.**

Математическая модель разработана на примере полноприводного экскаватора-погрузчика 4x4 с блокируемым межосевым дифференциалом и равновеликими колесами. Моделируется прямолинейное движение машины с постоянной скоростью по слабдеформируемому основанию. Силы гидростатического и гидродинамического воздействий спроецированы на скоростную систему координат ( $Ox_aY_aZ_a$ ) с началом в центре тяжести машины:  $P_{\text{лоб}}(Ox_a)$  – сила лобового сопротивления, Н;  $P_{\text{бок}}(OY_a)$  – сила бокового давления, Н;  $P_{\text{в}}(OZ_a)$  – выталкивающая сила, Н. Модель позволяет оценить подвижность и устойчивость ТТМ в условиях затопления при различных параметрах донного основания и водного потока. Пространственная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд представлена на рисунке 1.



Таблица 1 – Математическое описание модели прямолинейного движения колесной ТТМ через водную преграду вброд

Этапы расчета	Расчетные зависимости
1. Ввод исходных данных: $m, L, B, l_{цт}, P_{лоб}, P_{бок}, C_x, C_y,$ $V_a, V_{вп}, W_{ов}, h_{бр}, \rho, g$	$m, L, B, l_{цт}, C_x, C_y, V_a, V_{ен}, h_{бр}, \rho, g \in N$
2. Определение веса ТТМ, $G, H$	$G = m \cdot g \quad (1)$
3. Определение абсолютной (кажущейся) скорости, $V_{абс}, м/с$	$V_{абс} = \sqrt{V_a^2 + V_{ен}^2} \quad (2)$
4. Определение выталкивающей силы, $P_v, H$	$P_v = \rho_v \cdot g \cdot W_{ов}, P_v \in Z \quad (3)$
5. Определение силы лобового сопротивления, $P_{лоб}, H$	$P_{лоб} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot F_l \cdot V_a^2, P_{лоб} \in Z \quad (4)$
6. Определение силы бокового сопротивления, $P_{бок}, H$	$P_{бок} = 0,5 \cdot C_y \cdot \rho_v \cdot F_b \cdot V_{ен}^2, P_{бок} \in Z \quad (5)$
7. Определение суммарных нормальных реакций на осях, $N_1, N_2,$ $H$	$N_1 = \frac{G \cdot l_{цт} - P_v \cdot l_{цт} - P_{лоб} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{L} \quad (6)$ $N_2 = \frac{G \cdot (L - l_{цт}) - P_v \cdot (L - l_{цт}) + P_{лоб} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{L} \quad (7)$ $N_1, N_2 \in Z$
8. Определение нормальных реакций на колесах левого и правого бортов, $N_{11}, N_{21}, N_{12}, N_{22}, H$	$N_{11} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} - P_{бок} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{B} \quad (8)$ $N_{21} = \frac{N_2 \cdot \frac{B}{2} - P_{бок} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{B} \quad (9)$ $N_{12} = \frac{N_1 \cdot \frac{B}{2} + P_{бок} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{B} \quad (10)$ $N_{22} = \frac{N_2 \cdot \frac{B}{2} + P_{бок} \cdot \frac{h_{бр}}{3}}{B} \quad (11)$ $N_{11}, N_{21}, N_{12}, N_{22} \in Z$

Окончание таблицы 1

Этапы расчета	Расчетные зависимости
9. Определение силы тяги по сцеплению, $P_\varphi$ , Н	$P_\varphi = \varphi \cdot G$ (12)
10. Определение сил сопротивления боковому скольжению, $S_1$ , $S_2$ , Н	$S_1 = P_{бок} \frac{l_{\delta\delta}}{L}$ (13)
	$S_2 = P_{бок} \frac{L - l_{\delta\delta}}{L}$ (14)
11. Проверка условия по сопротивлению скольжению	$S_1 + S_2 = S \geq \varphi \cdot G = P_\varphi$ (15)
12. Определение силы сопротивления качению движителя, $P_f$ , Н	$P_f = G_m \cdot f$ (16)
13. Определение суммарной силы сопротивления, $P_\Sigma$ , Н	$P_\Sigma = P_f + P_{лоб}$ (17)
14. Определение силы тяги, $P_m$ , Н	$P_m = \frac{M_e \cdot i_{км} \cdot i_{см} \cdot i_{рк}}{r_{см}} \cdot \eta_m$ (18)
15. Проверка выполнения условия	$P_\varphi \geq P_m \geq P_\Sigma$ (19)

Система оценивания результатов, полученных на основе разработанной математической модели, представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Система оценивания результатов расчета

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 <b>Функциональный режим</b>
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 <b>Допустимый режим</b>
3. Нормальные реакции на одной из осей 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 сцепление с донной опорной поверхностью и начинает скольжение <b>Критический режим</b>
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 <b>Критический режим</b>

Результат оценки	Интерпретация результата
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 <b>Движение невозможно</b>

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

**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.**

### 2.1. Расчетная оценка объемного водоизмещения машины.

При оценке бродоходимости ТТМ ключевое значение имеет достоверность определения объемного водоизмещения, в связи с чем в исследовании применялись и оценивались два метода. Графоаналитический метод, основанный на анализе чертежей машины, позволяет теоретически рассчитать объем погруженной в воду части машины, однако требует наличия детальных конструкторских чертежей. Схема разбиения высоты борта исследуемой машины на блоки для пяти глубин водной преграды представлена на рисунке 2.

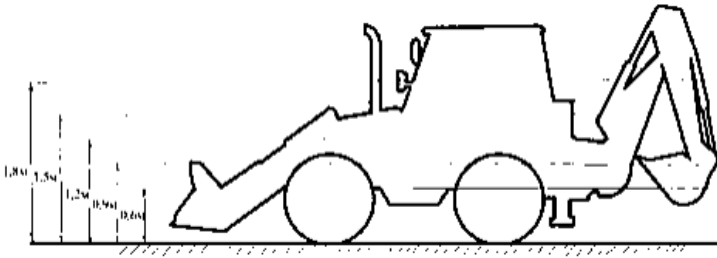


Рисунок 2 – Схема разбиения борта машины на блоки для пяти глубин водной преграды

Более совершенный метод компьютерного моделирования с использованием специализированных САД-программ (КОМПАС-3D) учитывает геометрические параметры машины более корректно. Построенные в программе КОМПАС-3D упрощенные 3D-модели экскаватора-погрузчика и его части, погруженной в воду на глубину 0,6 м, представлены на рисунке 3.

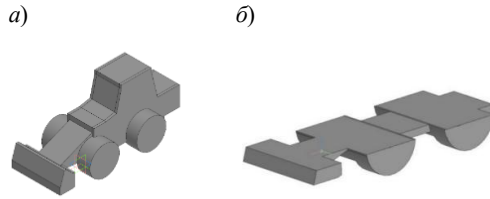


Рисунок 3 – Упрощенная 3D-модель экскаватора-погрузчика:  
 а – общий вид модели, построенной в программе КОМПАС-3D;  
 б – часть модели, погруженная в воду на глубину 0,6 м

Результаты сравнения значений объемного водоизмещения, полученные графоаналитическим методом (далее – ГАМ) и методом 3D-моделирования (далее – ММ), представлены в таблице 3, где  $\Delta$ ,  $\delta$  — абсолютная и относительная погрешности между ГАМ и ММ.

Таблица 3 – Результаты сопоставления объемного водоизмещения, полученные с помощью ГАМ и ММ

$h_{бр}$ , м	$W_{об}^{ГАМ}$ , м <sup>3</sup>	$W_{об}^{ММ}$ , м <sup>3</sup>	$\Delta$ , м <sup>3</sup>	$\delta$ , %
0,6	2,07	2,88	+0,81	<b>+39,13</b>
0,9	6,49	6,02	-0,47	-7,24
1,2	7,72	8,67	+0,95	<b>+12,31</b>
1,5	8,46	10,42	+1,96	<b>+23,17</b>
1,8	9,11	11,39	+2,28	<b>+25,02</b>

Проверка адекватности результатов с помощью экспериментального метода погружения показала предпочтительность использования метода компьютерного моделирования как более корректного.

## 2.2. Расчетная оценка коэффициентов сопротивления ТТМ на основе реализации имитационной модели движения ТТМ в водной среде в модуле ANSYS Fluent.

В исследовании моделируется прямолинейное движение ТТМ с постоянной скоростью через стоячую водную преграду. Для учета границы раздела фаз «вода–воздух» применен принцип обращения движения, обеспечивающий неподвижность расчетной области и снижение вычислительных затрат. Коэффициенты сопротивления определены в ANSYS Fluent с использованием многофазной модели Volume of Fluid (неявная схема, Open-FlowChannel), турбулентной модели k- $\epsilon$  Standart и схемы решателя Pressure-Based Coupled с дискретизацией второго порядка. Расчет выполнялся в стационарной постановке PseudoTransient с числом Куранта 50 и шагом по времени 0,001–0,05. Сходимость достигалась за 800–1500 итераций.

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

общее количество ячеек – 725123. Сеточная структура расчетной области и ТТМ представлена на рисунке 4.

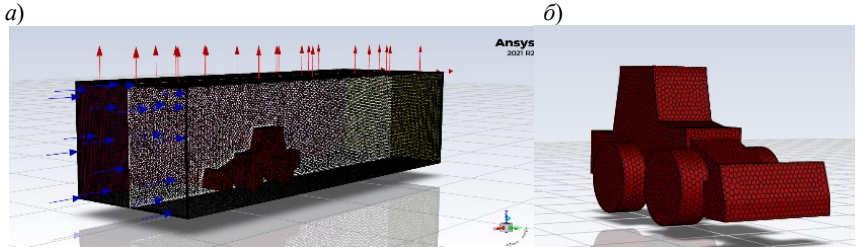


Рисунок 4 – Сеточная структура в модуле ANSYS Meshing:  
*a* – аксонометрия расчетной области; *b* – ТТМ

В настройках решателя задавались исследуемые скорости течения, а также глубина водной преграды как уровень раздела жидкой (синий цвет) и воздушной (серый цвет) фазы. Пример изображения границы раздела фаз для глубины 1,8 м представлен на рисунке 5.

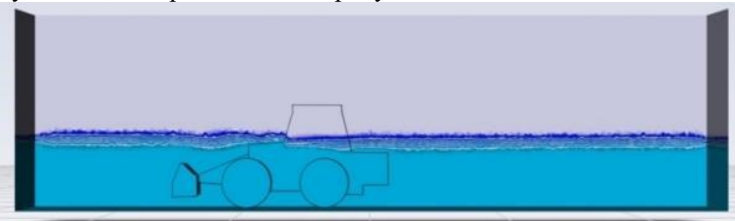


Рисунок 5 – Граница раздела фаз для водной преграды глубиной 1,8 м

Сходимость решения определялась по стабилизации значений контролируемых параметров – коэффициента сопротивления и массового расхода фаз в расчетной области. Разность между расходом фаз на входе в расчетную область и выходе из нее 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 4.

Таблица 4 – Коэффициенты сопротивления при лобовом двухфазном обтекании

Глубина водной преграды, $h_{бр}$ , м	Коэффициенты сопротивления $C_x$ при скорости водного потока $V$ :		
	$V_1=1,5$ м/с	$V_2=3,0$ м/с	$C_x^{ср}$
0,6	0,35	0,36	0,355
0,9	0,52	0,51	0,515
1,2	0,63	0,65	0,640
1,5	0,86	0,87	0,865
1,8	0,87	0,88	0,875

Для оценки сопротивления боковой поверхности на различных глубинах использовалась аналогичная методика расчета для трёх ключевых скоростей потока (0,5; 1,5 и 3,0 м/с), охватывающих типичный диапазон эксплуатационных условий. Результаты расчетов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты сопротивления при боковом двухфазном обтекании

Глубина водной преграды, $h_{бр}$ , м	Коэффициенты сопротивления $C_y$ при скорости водного потока $V$ :			
	$V_1=0,5$ м/с	$V_2=1,5$ м/с	$V_3=3,0$ м/с	$C_y^{ср}$
0,6	0,37	0,38	0,38	0,377
0,9	0,79	0,80	0,81	0,800
1,2	1,13	1,13	1,14	1,133
1,5	1,35	1,35	1,35	1,350
1,8	1,67	1,67	1,68	1,673

Корректность разработанной методики подтверждена экспериментально. Она может быть применена для исследования машин любой архитектурной конфигурации при условии использования адекватной виртуальной 3D-модели.

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

**3.1. Экспериментальные исследования по определению объемного водоизмещения.**

Валидация значений объемного водоизмещения, полученных расчетным путем, проводилась экспериментально – методом погружения (далее – МП) модели в резервуар с водой с фиксацией изменений уровня воды до и после погружения. Оборудование для проведения экспериментального определения объемного водоизмещения представлено на рисунке 6.



Рисунок 6 – Оборудование для проведения экспериментального определения объемного водоизмещения

Сравнение результатов методов расчета объема: ГАМ и ММ относительно МП представлено в таблице 6, где  $\Delta_1$ ,  $\delta_1$  — абсолютная и относительная погрешности между МП и ГАМ;  $\Delta_2$ ,  $\delta_2$  — абсолютная и относительная погрешности между МП и ММ.

Таблица 6 – Сравнение результатов определения объемного водоизмещения экскаватора-погрузчика тремя методами

$h_{бр}, \text{ м}$	$W_{ов}^{МП}, \text{ м}^3$	$W_{ов}^{\Gamma AM}, \text{ м}^3$	$\Delta_1, \text{ м}^3$	$\delta_1, \%$	$W_{ов}^{MM}, \text{ м}^3$	$\Delta_2, \text{ м}^3$	$\delta_2, \%$
0,6	2,58	2,07	0,51	19,77	2,88	0,30	11,63
0,9	5,68	6,49	0,81	14,26	6,02	0,34	5,99
1,2	7,91	7,72	0,19	2,40	8,67	0,76	9,61
1,5	9,63	8,46	1,17	12,15	10,42	0,79	8,21
1,8	10,49	9,11	1,38	13,15	11,39	0,90	8,58

Из таблицы 6 видно, что значения объемного водоизмещения, полученные ММ и МП, наиболее близки между собой: их разность во всем диапазоне глубин не превышает 12%. Такой результат позволяет рекомендовать использование ММ для определения объемного водоизмещения ТТМ.

### 3.2. Экспериментальное исследование на физических моделях ТТМ по определению коэффициентов сопротивления машины в аэродинамической трубе.

Для определения гидродинамических характеристик ТТМ разработана экспериментальная методика, реализованная в аэродинамической трубе (далее – АДТ). Модель ТТМ была выполнена из дерева в масштабе 1:10 с соблюдением геометрического подобия таким образом, чтобы можно было последовательно наращивать высоту модели, имитируя ее погружение (рисунок 7).



Рисунок 7 – Физическая модель экскаватора-погрузчика в масштабе 1:10

Исследования проводились при различных углах горизонтального набегающего потока воздуха в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $30^\circ$ . Установка модели на поворотном круге в рабочей зоне АДТ представлена на рисунке 8.

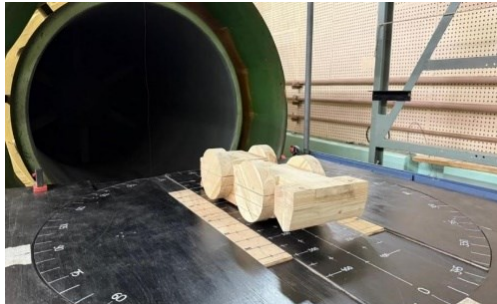


Рисунок 8 – Установка модели на поворотном круге в рабочей зоне АДТ

В таблицах 7 и 8 представлены значения коэффициентов сопротивления  $C_x$  и  $C_y$ , полученных экспериментально и имитационным моделированием при углах набегающего потока 0 и 90°, соответствующих лобовому и боковому сопротивлению, с абсолютными и относительными (в %) отклонениями.

Таблица 7 – Сравнение значений коэффициента лобового сопротивления  $C_x$ , полученных экспериментально и имитационным моделированием

Глубина водной преграды, $h_{бр}$ , м	$C_{x,расч}$	$C_{x,эксп}$	$\Delta$	$\delta$ , %
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

Таблица 8 – Сравнение значений коэффициента бокового сопротивления  $C_y$ , полученных экспериментально и имитационным моделированием

Глубина водной преграды, $h_{бр}$ , м	$C_{y,расч}$	$C_{y,эксп}$	$\Delta$	$\delta$ , %
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 коэффициентов сопротивления демонстрируют высокую степень их согласованности: по  $C_x$  – для всех рассмотренных глубин водного потока расхождения не превышают 5–11%, по  $C_y$  – не превышают 2,6%. Такое совпадение подтверждает достоверность разработанной методики численного имитационного моделирования и свидетельствует о ее применимости для исследования гидродинамических характеристик ТТМ.

### 3.3. Оценка изменения коэффициентов гидродинамического сопротивления натуре при изменении угла набегающего потока.

Значения сил гидродинамического сопротивления ТТМ при изменении угла набегающего потока важно знать для оценки бродоходности машин при маневрировании на затопленной местности. В процессе модельных испытаний определялись силы аэродинамического сопротивления модели с последующим расчетом значений коэффициентов и сил гидродинамического сопротивления натурального образца. Результаты обработки данных эксперимента представлены в графическом виде, как зависимости трех ключевых параметров ( $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_{mz}$ ), оказывающих влияние на величину сил гидродинамического сопротивления модели в потоке, от угла набегающего потока. Графики построены для двух уровней водной преграды и представлены на рисунках 9–10.

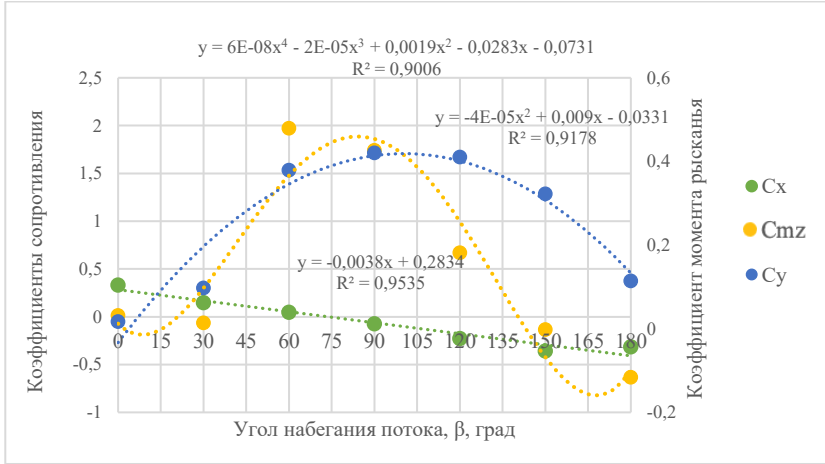


Рисунок 9 – Зависимость лобового, бокового коэффициентов сопротивления и коэффициента момента рыскания от угла набегающего потока для глубины водного потока 0,6 м

При малых углах (0–30°) преобладает лобовое сопротивление  $C_x$ , с незначительным  $C_y$ . 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 показателей вблизи 45°.

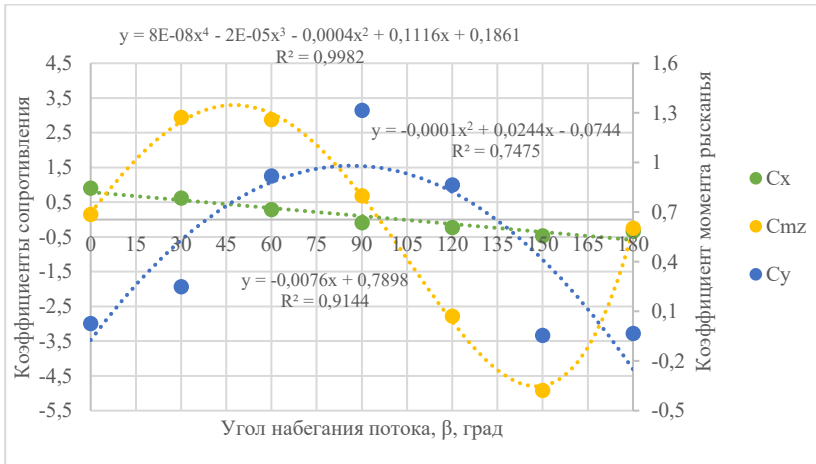


Рисунок 10 – Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рыскания от угла набегающего потока для глубины водного потока 1,5 м

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

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

В рамках исследования разработан комплексный метод оценки бродоходимости колесных ТТМ, основанный на алгоритме, учитывающем гидростатические, гидродинамические и опорно-сцепные характеристики при преодолении водных преград (рисунок 11).

Разработанным методом для двухосной ТТМ JCB 4CX выполнены расчеты предельных глубин преодоления водных препятствий при различных скоростях движения машины и течения. Расчеты проведены для трех случаев: прямолинейного движения ТТМ через стоячую воду, обтекания неподвижной машины боковым потоком с постоянной скоростью, а также совмещенного режима движения машины с одновременным боковым обтеканием потоком постоянной скорости.

Установлено, что при прямолинейном движении в стоячей воде на первой передаче экскаватор-погрузчик JCB 4CX теряет сцепление управляемых колес с опорной поверхностью на глубине 1,2 м, а на второй передаче управляемость нарушается уже на глубине 1,075 м. Таким образом, максимальная глубина преодоления стоячих водных преград в функциональном режиме для данной машины не превышает 1,1 м, что вдвое больше нормативной бродоходимости в 0,55 м.

В условиях бокового обтекания неподвижной машины критическими параметрами являются скорость потока 0,5 м/с при глубине 1,2 м и скорость 2,5 м/с при глубине 1,05 м. На указанных глубинах реакции борта, воспринимающего давление потока, становятся отрицательными, что приводит к потере устойчивости и опрокидыванию машины. Графическая интерпретация зависимостей нормальных реакций на осях от глубины брода представлена на рисунке 12.

При прямолинейном движении ТТМ через текущую водную преграду под углом  $90^\circ$  к направлению потока потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси) происходит на глубине 1,2 м при движении на первой передаче и скорости потока 0,5 м/с. При прямолинейном движении ТТМ при его скорости 0,5 м/с, а также на глубине 0,85 м при скорости потока 2,5 м/с. На второй передаче критическая глубина составляет 1,025 м при скорости потока 0,5 м/с и 0,8 м при скорости потока 2,5 м/с.

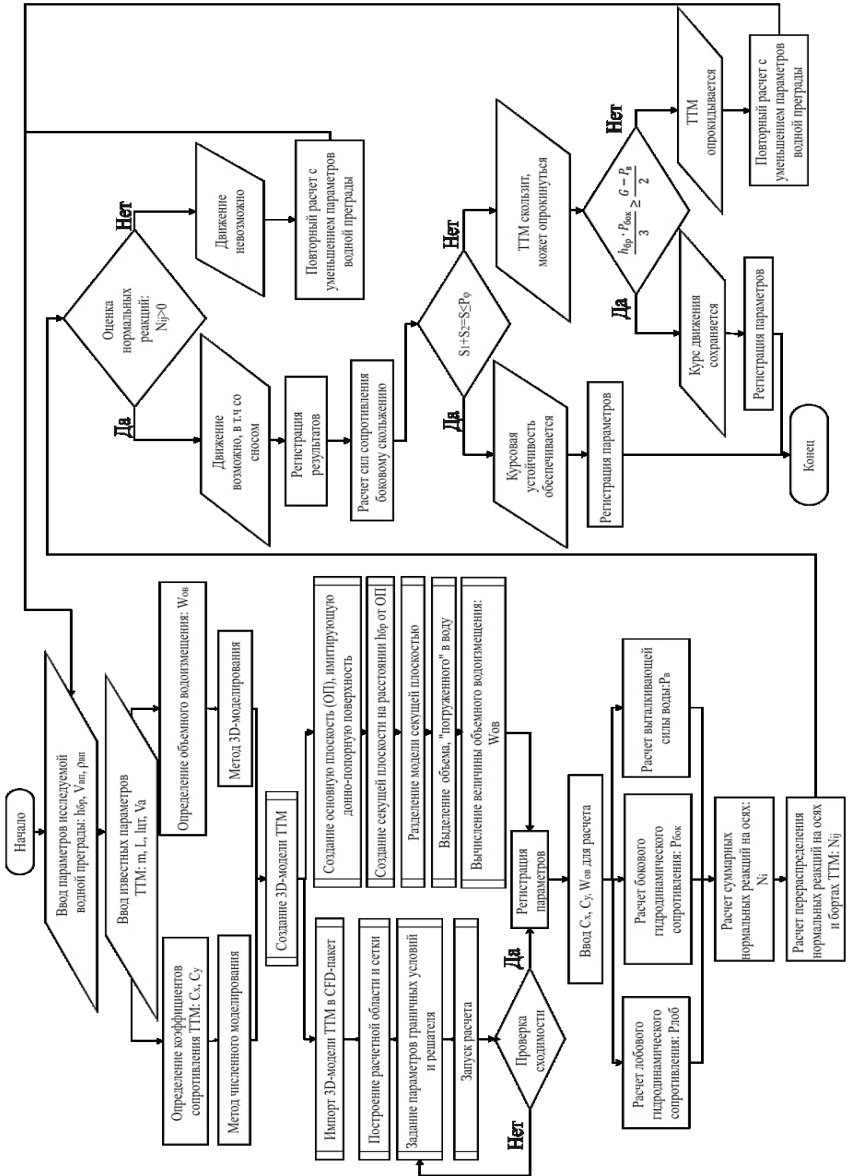


Рисунок 11 – Блок-схема применения метода оценки бродоходности колесных транспортно-технологических машин

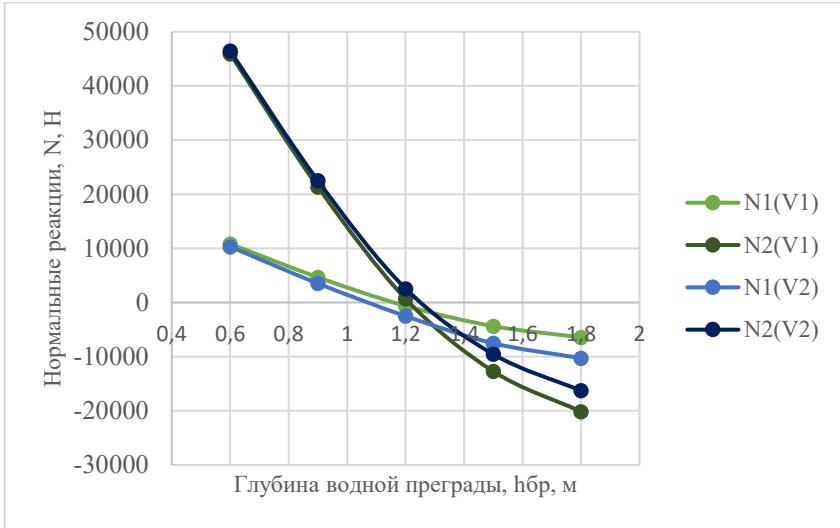


Рисунок 12 – Зависимость нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика от глубины брода

Опрокидывание машины на первой передаче происходит при глубине 1,2 м (скорость потока 0,5 м/с) и 1,035 м (скорость потока 2,5 м/с). На второй передаче опрокидывание возникает на глубине 1,1 м при скорости потока 2,5 м/с.

Таким образом, при движении ТТМ перпендикулярно направлению течения водного потока безопасная глубина преодоления машиной водной преграды на низших передачах при скорости потока до 2,5 м/с не превышает 1 м. Это означает, что экскаватор-погрузчик JCB 4CX способен безопасно работать на глубине, в 1,8 раза превышающей паспортную бродоходимость.

**Технико-экономическая оценка**, выполненная на примере экскаватора-погрузчика JCB 4CX, показала, что увеличение нормативно заданного уровня его бродоходимости до расчетно-допустимого обеспечивает снижение затрат на преодоление протяженных зон затопления по глубоководному броду своим ходом в 5,6 раза по отношению к транспортировке машины на пароме ПТС-2 и в 560 раз – по отношению к авиадоставке на внешнем подвесе вертолетом Ми-26. Таким образом, разработанный в диссертации метод не только обеспечивает техническую возможность оценки бродоходимости ТТМ, но и подтверждает значительную экономическую эффективность ее повышения как способа минимизации эксплуатационных издержек.

## 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-цепные 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 машины при лобовом и боковом обтекании ее водой.

4. Для подтверждения теоретических расчетных данных проведены гидростатические и аэродинамические экспериментальные исследования на масштабных физических моделях ТТМ. В ходе экспериментов определено объемное водоизмещение машины для различных глубин погружения, определены силы аэродинамического сопротивления модели с последующим пересчетом в коэффициенты гидродинамических сопротивлений модели и натурного 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 бродоходности 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.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ**

1. 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.

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. 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.

5. 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.

### Публикации в прочих изданиях

6. Лукашук, Е. Р. (Магдина Е.Р.) Особенности проведения автотехнической экспертизы при опрокидывании дорожно-строительных машин, работающих в зонах затопления / Е. Р. Лукашук (Е.Р. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

### Программы для ЭВМ, имеющие государственную регистрацию

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025668100 Российская Федерация. Программа для оценки бродопроеходимости колесных транспортно-технологических машин: заявл.

24.06.2025: опубл. 10.07.2025 / В. Н. Добромиров, Е. Р. Магдина, А. О. Кожуховский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 07.10.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 111.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А