

ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора технических наук,
доцента Макарова Владимира Сергеевича**
на диссертационную работу Магдиной Елизаветы Ростиславовны
**«Метод оценки бродоходимости колесных
транспортно-технологических машин»**
представленную в диссертационный совет 24.2.380.05
при ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет» к публичной защите на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

1. Актуальность темы диссертационной работы

Колесные транспортно-технологические машины находят широкое применение при освоении труднодоступных регионов страны. При этом их эксплуатация часто организуется в условиях бездорожья, на неподготовленной местности, порой с преодолением водных преград вброд. Их эффективная работа в таких условиях критически зависит от бродоходимости – способности самостоятельно преодолевать водные препятствия. Актуальность разработки методов оценки этого параметра напрямую связана с необходимостью обеспечения надежного и безопасного выполнения задач в нефтегазовой отрасли, лесном хозяйстве, МЧС, оборонном комплексе, строительстве в удаленных регионах.

Традиционные методы оценки бродоходимости часто носят в основном эмпирический или упрощенный расчетный характер, не учитывают в полной мере комплексного взаимодействия множества факторов: гидродинамических сил (сопротивления воды движению, волнового сопротивления, подъемной силы), сил плавучести и остойчивости, характеристик силовой установки и трансмиссии (с учетом работы в воде), состояния грунта под водой, влияния конструкции машины (расположения агрегатов, герметичности, системы охлаждения) и свойств перевозимого груза. Существующие нормативные документы и расчетные методики зачастую не отражают реальной сложности процесса форсирования брода современными транспортно-технологическими машинами.

Неадекватная оценка бродоходимости ведет либо к неоправданному ограничению возможностей техники (и, как следствие, экономическим потерям), либо к аварийным ситуациям при попытке преодоления непроходимого для

конкретной данной машины брода (затопление, потеря груза, повреждение агрегатов). Разработка научно обоснованного метода позволит проводить более достоверную оценку бродоходимости водных преград серийной техникой, обосновывать конструктивные требования к машинам для конкретных условий эксплуатации, повысить безопасность и снизить риски при форсировании водных преград вброд.

Современный уровень развития вычислительной техники и методов математического моделирования создает предпосылки для разработки более точных и комплексных методов оценки, интегрирующих различные физические аспекты процесса. Актуальность работы подчеркивается необходимостью внедрения таких передовых подходов в практику проектирования и испытаний колесных транспортно-технологических машин.

Таким образом, разработка нового, более точного и комплексного метода оценки бродоходимости колесных транспортно-технологических машин, учитывающего всю сложность физических процессов и современные возможности моделирования, является весьма актуальной научной и практической задачей. Работа направлена на решение именно этой задачи, что определяет ее высокую значимость для развития теории и практики создания и эксплуатации колесных машин высокой проходимости.

2. Научная новизна положений, сформулированных в диссертации

Научные положения, выносимые автором на защиту, обладают значительной научной новизной и вносят существенный вклад в теорию проходимости колесных транспортно-технологических машин. Впервые разработана комплексная математическая модель прямолинейного движения транспортно-технологической машины через водную преграду вброд по слабдеформируемому донному основанию. Новизна этой модели заключается в принципиально новом, комплексном учете совокупности факторов: гидродинамических сил (лобового и бокового сопротивления,), гидростатических сил (подъемной силы), силового взаимодействия колес со слабдеформируемым подводным грунтом и динамики машины в специфических условиях брода. Такой интегрированный подход, охватывающий гидростатику, гидродинамику и динамику движения машины для

условий брода, является инновационным. При создании модели и определении исходных данных для ее реализации разработаны оригинальные методики и получены новые результаты расчетной оценки ключевых гидростатических и гидродинамических характеристик машины: объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления. Новизна исследования заключается и в адаптации и специализированном применении методов вычислительной гидродинамики для сложной геометрии транспортно-технологических машин в условиях частичного погружения и движения на границе раздела сред, характерных именно для брода. С их помощью возможно расчетное определение водоизмещения, коэффициентов лобового и бокового сопротивления, построение картин обтекания транспортно-технологических машин в широком диапазоне глубин и скоростей, релевантных форсированию водной преграды.

Для валидации предложенных автором расчетных CFD-методик и получения независимых данных разработаны оригинальные экспериментальные программы-методики и получены новые результаты экспериментальных исследований на физических моделях транспортно-технологической машины типа экскаватор-погрузчик. Существенная новизна этих методик заключается в инновационном применении испытаний масштабных физических моделей в аэродинамической трубе с использованием принципа гидродинамического подобия (число Рейнольдса) для определения гидродинамических характеристик машины в условиях преодоления брода. Интеграция разработанных моделей и методик позволила предложить новый метод расчетной оценки бродоходимости транспортно-технологических машин. Научная новизна метода заключается, во-первых, в его комплексности, основанной на синтезе авторской математической модели движения, результатов специализированных CFD-расчетов и экспериментально подтвержденных данных гидродинамических характеристик. Во-вторых, новизна проявляется в разработке и обосновании критериев предельной бродоходимости, учитывающих реализуемое тяговое усилие и устойчивость машины (риск опрокидывания, всплытия). В-третьих, новизна заключается в алгоритмизации практического применения метода для оценки возможностей конкретной транспортно-технологической машины на заданном броде или выбора оптимальной конфигурации машины.

Таким образом, научная новизна диссертационной работы заключается в создании принципиально нового комплекса взаимосвязанных моделей, методик и интегрированного метода, обеспечивающего качественно новый уровень точности и обоснованности оценки бродоходимости колесных транспортно-технологических машин за счет комплексного учета физики процессов, применения передовых методов компьютерного моделирования и оригинальных экспериментальных подходов. Таким образом, все положения, выносимые на защиту, содержат элементы существенной научной новизны.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность

Достоверность разработанной математической модели и предложенного метода оценки бродоходимости доказана путем их валидации: проверка корректности численной реализации моделей (сетки, схемы, сходимость решений) в программном комплексе ANSYS Fluent, строгое сопоставление результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Автор представил убедительные результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по коэффициентам сопротивления. Наблюдаемое совпадение (в пределах допустимых погрешностей, характерных для такого рода сложных задач) подтверждает адекватность моделей реальным физическим процессам и достоверность прогнозов, сделанных с их помощью.

Достоверность научных результатов диссертации дополнительно подтверждается их успешной апробацией на 12 международных и межрегиональных научно-практических конференциях в период с 2022 по 2025 гг., включая профильные форумы в СПбГАСУ: «Транспортная доступность Арктики», «Актуальные проблемы современного строительства», «Архитектура, строительство, транспорт, экономика», «Организация и безопасность дорожного движения»), а также конференции в Москве, Симферополе и других научных центрах. Это также подтверждается актами внедрения результатов исследования, выданным ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и СПбГАСУ.

Основные положения диссертации опубликованы автором в 10 печатных работах, в том числе 5 - в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на

официальном сайте ВАК РФ, а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

Выводы и рекомендации диссертационной работы обладают высокой значимостью как для развития науки, так и для решения актуальных практических задач в сфере создания и эксплуатации транспортно-технологических машин.

Для науки работа вносит существенный вклад в теорию проходимости и гидродинамику колесных транспортных средств. Разработанная комплексная математическая модель движения в брод, новые методики оценки гидродинамических характеристик с использованием CFD и инновационные экспериментальные подходы с применением аэродинамических труб на основе гидродинамического подобия расширяют теоретическую базу и представляют ценный научный инструментарий. Полученные уникальные данные об объемном водоизмещении и коэффициентах сопротивления образуют важную базу знаний для дальнейших исследований.

Для практики предложенный метод оценки бродоходимости является эффективным инструментом для конструкторских бюро, позволяя оптимизировать проектирование транспортно-технологических машин под требования бродоходимости, снижать затраты за счет виртуальных испытаний и совершенствовать нормативную базу для объективной сертификации. Эксплуатирующим организациям (МЧС, лесозаготовки, нефтегаз, ВПК) метод предоставляет возможность точно оценивать возможности техники при преодолении водных преград, разрабатывать безопасные маршруты, минимизировать аварийные риски и обоснованно выбирать технику.

5. Общая оценка структуры и содержания диссертации

Работа имеет классическую структуру, включающую введение, четыре содержательные главы, заключение, список из 188 использованных источников и пять приложений. Объем диссертации в 218 страниц представляется достаточным для раскрытия темы, а наличие 42 таблиц и 81 рисунка свидетельствует о глубокой проработке материала и наглядном представлении результатов.

Во введении автор убедительно обосновал актуальность темы, четко сформулировал цель, задачи, научную новизну, практическую значимость и положения, выносимые на защиту, что обеспечивает ясное понимание замысла и значимости исследования.

Первая глава выполняет аналитическую функцию. В ней проведен системный анализ современных проблем повышения проходимости колесных транспортно-технологических машин при форсировании водных преград. Автор убедительно обосновал необходимость разработки нового комплексного метода оценки бродоходимости, интегрирующего математическое моделирование, компьютерное имитационное моделирование и экспериментальные исследования, что создает научный фундамент для последующих глав.

Вторая глава является основной теоретической частью. В ней разработана математическая модель взаимодействия машины с водной средой и донным основанием, комплексно учитывающая гидростатические, гидродинамические силы, сцепные свойства колес и тягово-динамические возможности машины. Проведенный анализ влияния параметров движения и преграды на устойчивость машины дополняет модель. Разработка методик расчетной оценки гидродинамических характеристик (объемного водоизмещения и коэффициентов сопротивления) с применением имитационного компьютерного моделирования (CFD) обеспечивает необходимые исходные параметры для модели и метода.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям. Разработанные методики экспериментальных гидростатических исследований и программы-методики аэродинамических испытаний на масштабных моделях демонстрируют оригинальный подход. Полученные результаты экспериментально-расчетного определения на базе модельных испытаний ключевых гидродинамических характеристик для натурального образца являются новыми и служат для валидации расчетных методик, представленных во второй главе.

Четвертая глава представляет собой закономерный результат интеграции предыдущих исследований. В ней предложен и обоснован метод оценки бродоходимости, базирующийся на разработанной математической модели, методах имитационного моделирования и экспериментальных данных. Метод позволяет определять критические параметры движения вброд: предельные

глубины, допустимые скорости течения воды и передвижения машины. Представленный пример расчета для конкретной транспортно-технологической машины наглядно иллюстрирует практическую применимость метода.

В заключении изложены основные научные и практические результаты работы, подтверждающие достижение поставленной цели и решение сформулированных задач.

Список литературы включает 188 источников, преимущественно современные и релевантные теме исследования, что свидетельствует о глубоком анализе состояния проблемы. Приложения содержат вспомогательные материалы, дополняющие основное содержание.

Диссертация структурно целостна и логически выдержана. Все элементы работы взаимосвязаны и последовательно ведут к достижению поставленной цели. Содержание глав полностью соответствует их названиям и поставленным задачам. Материал изложен систематизированно и аргументированно. Структура и содержание диссертации полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

6. Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям

Диссертационная работа и ее автореферат полностью соответствуют требованиям Положения о присуждении ученых степеней. Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.11 "Наземные транспортно-технологические средства и комплексы" (пп. 1 и 3): по п. 1 - в части разработки комплексной математической модели прямолинейного движения транспортно-технологических машин через водную преграду, представленной во второй главе; по п. 3 - в части разработки и реализации оригинальных методик экспериментальных гидростатических и аэродинамических исследований масштабных моделей транспортно-технологических машин, представленных в третьей главе.

Содержание автореферата логично, последовательно и полностью отражает все этапы исследования, основное содержание, научные результаты, новизну и практическую значимость диссертации, включая все положения, выносимые на защиту.

7. Замечания и недостатки

При общей положительной оценке диссертационной работы необходимо отметить ряд недостатков и замечаний:

1. Отсутствует количественная оценка погрешности математической модели (гл. 2) при вариации входных параметров (свойств транспортно-технологических машин, свойств водной преграды).

2. В разделе о CFD-моделировании (гл. 2) недостаточно подробно описаны критерии сходимости сеточных решений и обоснование выбора конкретных моделей турбулентности для условий частичного погружения.

3. Не в полной мере проанализированы потенциальные погрешности и ограничения методики определения гидродинамических характеристик в аэродинамической трубе на основе критериев подобия (гл. 3), особенно для учета свободной поверхности и волнообразования.

4. Результаты экспериментальных исследований (гл. 3) представлены для ограниченного числа конфигураций моделей транспортно-технологических машин, что затрудняет оценку универсальности полученных зависимостей C_x и водоизмещения.

5. Не представлено сравнительного анализа эффективности и точности предложенного метода с существующими (более простыми) методиками оценки бродоходимости на одних и тех же тестовых примерах.

6. В диссертации недостаточно глубоко проанализированы ограничения предложенного метода, связанные, например, с необходимостью наличия детальной 3D-модели транспортно-технологической машины для CFD, сложностью определения точных свойств подводного грунта или влиянием нестационарности течения.

Указанные замечания на снижают общей научной ценности работы и рекомендуются к учету в ходе дальнейших исследований автора.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа «Метод оценки бродоходимости колесных транспортно-технологических машин», выполненная Магдиной Елизаветой Ростиславовной и представленная на соискание ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи, имеющей значение для развития машиностроения, как отрасли знаний, в части оценки и повышения подвижности самоходных колесных машин.

Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Магдина Елизавета Ростиславовна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Официальный оппонент:

Макаров Владимир Сергеевич

доктор технических наук, доцент,

(05.05.03 – Колёсные и гусеничные машины),

Профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

т. +7 905 012 44 03

E-mail: makvl2010@gmail.com

Я, Макаров Владимир Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«27» октября 2025 г.

В.С. Макаров

Подпись В.С. Макарова заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «Нижегородский
государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»



И.Н. Мерзляков