

Научная статья
УДК 62-182
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>
EDN: KWZIXN



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА ЧЕРЕЗ ВОДНУЮ ПРЕГРАДУ ВБРОД

Е.Р. Магдина

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург, Россия
elisluk97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Гидродинамическое давление играет значительную роль в работе транспортно-технологических машин, используемых в зонах затопления для проведения восстановительных и неотложных работ. Изучение этого влияния имеет большую актуальность в связи с необходимостью повышения эффективности и безопасности операций в условиях водной среды. Гидродинамическое давление может вызывать изменения в поведении машины, влиять на ее маневренность и устойчивость. Понимание этих процессов позволяет разрабатывать более эффективные методы борьбы с негативными последствиями воздействия водной среды на работу машин, может оценить безопасные условия их применения. Целью исследования влияния гидродинамического давления на движение транспортно-технологических машин через водную преграду вброд, на примере полноприводного экскаватора-погрузчика с равновеликими колесами, является определение критических значений параметров водной преграды, при которых обеспечивается эффективное и безопасное преодоление водных препятствий данной техникой.

Материалы и методы. Для анализа использовались теоретические исследования, связанные с влиянием водного потока на движение самоходных колесных машин. Проводилось математическое моделирование прямолинейного движения экскаватора-погрузчика через водную преграду различной глубины и скорости течения. В качестве основных исследуемых параметров были приняты поперечное (лобовое) гидродинамическое сопротивление, продольное (боковое) гидродинамическое давление и нормальные реакции на колесах машины.

Результаты. Выведены математические зависимости для определения нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика при воздействии поперечного гидродинамического сопротивления в стоячей воде, нормальных реакций на левом и правом бортах машины при воздействии продольного гидродинамического давления на неподвижную и движущуюся машину, приведены графические зависимости нормальных реакций на колесах от глубины водного потока.

Обсуждение и заключение. Наличие неблагоприятных факторов водной среды, влияющих на движение транспортно-технологических машин через водную преграду, дает основание для разработки методики определения предельных параметров затопления, при которых машины смогут безопасно и эффективно выполнять работы в зонах затопления. Исследование влияния гидродинамического давления на транспортно-технологические машины является важной задачей, направленной на решение этой проблемы. Полученные результаты помогут развивать технику и технологии для работы в условиях повышенного гидродинамического давления, что способствует развитию отраслей, связанных с работой наземных транспортно-технологических машин в водной среде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наводнение, транспортно-технологические машины, экскаватор-погрузчик, гидродинамическое давление, коэффициент обтекаемости, водная преграда, скорость течения

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» в рамках гранта СПбГАСУ в 2024 году на выполнение профессорско-преподавательских научно-исследовательских работ по научному направлению «Автомобильно-дорожный комплекс – интеллектуальные транспортные системы» № 13-НГПР-24.

© Магдина Е.Р., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Магдина Е.Р. Оценка влияния гидродинамического давления на движение экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 672-690. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

EDN: KWZIXN

ASSESSMENT OF HYDRODYNAMIC PRESSURE EFFECT ON BACKHOE-LOADER MOVEMENT TO WADE THROUGH THE WATER OBSTACLE

Yelizaveta R. Magdina

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia
elisluk97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Hydrodynamic pressure plays an essential role in the operation of transport and technological machines used in flooded areas for recovery and emergency actions. The study of this influence has a great relevance due to the necessity of improving the work efficiency and safety in water environment. Hydrodynamic pressure can cause changes in machine operation and influence on its maneuverability and stability. Understanding of these processes allows to develop more effective methods to prevent the negative impact consequences of the water on the machine performances, let us evaluate the safe conditions of their use. The aim of the study of hydrodynamic pressure effect on transport and technological machine movement to wade through the water impediment, using the example of an all-wheel drive excavator-loader with equal-sized wheels, is to determine the critical values of the water barrier parameters, which ensure effective and safe overcoming of water obstacles by this type of vehicle.

Materials and methods. Theoretical studies related to the influence of water flow on the movement of self-propelled wheeled machines were used for the analysis. Mathematical modelling of rectilinear movement of backhoe-loader through the water barrier of different depth and with different flow velocity was carried out. Transverse (frontal) hydrodynamic resistance, longitudinal (lateral) hydrodynamic pressure and standard reactions on the machine wheels were taken as the main parameters under study.

Results. Mathematical relationships were derived to determine the standard reactions on the front and rear axles of the excavator-loader under the influence of transverse hydrodynamic resistance in standing water, normal reactions on the left and right sides of the machine under the influence of longitudinal hydrodynamic pressure on the stationary and moving machine, graphical relations of normal reactions of the wheels depending on the depth of the water stream were deduced.

Discussion and conclusion. The presence of unfavorable factors of the water environment effecting the movement of transport and technological machines through the water obstacle provides the basis for the development of a methodology for determining the maximum flooding parameters at which machines can perform work safely and effectively in flooded areas. The study of the influence of hydrodynamic pressure on transport and technological machines is an important task aimed at solving this problem. The obtained results will help to develop machine building techniques and technologies for operation in conditions with increased hydrodynamic pressure, which contributes to the development of industries related to the operation of land transport and technological machines in the aquatic environment.

KEYWORDS: flooding, transport and technological machines, backhoe-loader, hydrodynamic pressure, streamline coefficient, water obstacle, flow velocity

© Magdina Ye.R., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ACKNOWLEDGEMENTS: *the study was carried out at the expense of the Federal State Budgetary Higher Educational Institution "Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering" within the grant in 2024 for the performance of professorial and teaching research works in the scientific direction "Automobile and Highway Complex - Intelligent Transport Systems" №13-NPR-24.*

The article was submitted: 30.07.2024; approved after reviewing: 23.09.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Magdina Ye.R. Assessment of hydrodynamic pressure effect on backhoe-loader movement to wade through the water obstacle. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21 (5): 672-690. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные наводнения в городских условиях стали одними из основных источников угрозы для жизни и имущества людей и поэтому вызывают большую озабоченность по всему миру [1, 2, 3]. Наводнения в городах могут привести к серьезным жертвам, а также к значительным экономическим и социально-экологическим последствиям, особенно в высоко урбанизированных мегаполисах с плотным населением и социальными объектами [4, 5]. В пострадавших регионах перебои в работе транспортных сетей часто приводят к критическому дефициту предметов первой необходимости, таких как продукты питания и вода [6, 7]. Для того чтобы грамотно управлять наводнениями, необходимо определить риск неустойчивости, которому подвергаются транспортные средства в зонах, подверженных наводнениям [8, 9].

В научной работе [10] описаны экспериментальные исследования на масштабных моделях автомобилей Ford Focus, Volvo XC90 и Ford Transit по определению значений глубины и скорости водного потока, при которых появится начальная скорость движения неподвижного (припаркованного) частично затопленного автомобиля.

В исследовании [11] были проведены эксперименты с использованием трех типов физических моделей автомобилей Mini Cooper, Mitsubishi Pajero, BMW X5 в масштабе, причем для каждого типа автомобиля было испытано по два масштаба 1:43 и 1:18. На основе указанных экспериментов определена формула для моделирования начальной скорости припаркованных затопленных автомобилей, исходя из массы и размеров автомобиля, сил плавучести и сопротивления.

В работах [12, 13] на основе исследования [11] была применена численная модель для изучения влияния транспортных средств на распространение потоков паводковых вод по

городским поймам и, с другой стороны, для определения влияния потоков паводковых вод на устойчивость транспортных средств.

В [14] был получен критерий устойчивости, включающий различные уклоны грунта и углы ориентации автомобиля, для частично погруженных в воду автомобилей (Honda Accord и Audi Q7). Выведена и проверена формула, основанная на механике, с применением эмпирических данных, полученных на двух типах масштабных моделей транспортных средств.

Основное внимание в исследованиях [15, 16] уделяется описанию зарождающегося движения неподвижных автомобилей во время наводнения с использованием трехмерной численной модели для оценки вклада сил сопротивления и подъемной силы. Также были определены рекомендуемые критерии безопасности для легковых автомобилей и автомобилей экстренных служб.

В [17] разработан коэффициент устойчивости для автомобилей, подверженных затоплению. Эффекты трения и плавучести были проанализированы путем проведения экспериментов с 12 различными физическими моделями автомобилей в трех масштабах (1:14, 1:18 и 1:24). Результаты позволили определить стабильную область в части глубины и скорости потока для припаркованных автомобилей в паводковых водах.

Изучение начального плавучего состояния частично погруженных автомобилей с учетом скорости потока и глубины воды в работе [18], а также различных ориентаций автомобиля относительно паводковой воды позволило разработать зависимость между глубиной стоячей воды и скоростью движения транспортных средств.

Обзор научных экспериментов выявил значительный объем работ, связанных с влиянием затоплений различного генезиса на транспорт и транспортную инфраструктуру. Однако данные исследования, как правило, связаны с конкретными событиями и обстоятельствами

или географическими районами с ограниченными возможностями обобщения.

Экспериментальные исследования в данной научной области связаны больше с изучением устойчивости неподвижных (припаркованных) легковых автомобилей при различных глубинах затопления и скорости водного потока. А также используется подробное трехмерное моделирование движения паводковых вод вокруг транспортных средств и оцениваются силы, включая гидродинамическое сопротивление, действующее на транспортное средство. Подробные модели позволяют лучше изучить гидродинамические силы, однако ни одно исследование не включало изучение влияния гидродинамического давления на транспортно-технологические машины в движении.

Актуальность исследования влияния продольного и поперечного гидродинамического давления на движение транспортно-технологической машины (ТТМ) вброд обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности перемещения техники через водные преграды. В условиях глобального изменения климата и увеличения частоты экстремальных гидрологических явлений, таких как наводнения, паводки и половодья, возрастает потребность в повышении мобильности и функциональности ТТМ, способных самостоятельно преодолевать водные препятствия при аварийно-спасательных работах в зонах затопления [19, 20]. Изучение гидродинамического давления позволит определить, как водная преграда влияет на тягово-сцепные свойства машин, а также оценить риски, связанные с возможной потерей проходимости и устойчивости.

В условиях стихийных бедствий, таких как наводнения, ТТМ играют критически важную роль в ликвидации их последствий и обеспечении безопасности населения. Эти машины, включая бульдозеры, экскаваторы, погрузчики и амфибийные транспортные средства, должны быть способны эффективно работать в условиях затопленных территорий, выполняя широкий спектр задач: расчистка путей для эвакуации населения и доставки гуманитарной помощи, удаление завалов, снос разрушенных конструкций, восстановление проезжих дорог, добыча и перемещение грунта для создания дамб и перемычек, предотвращающих распространение воды в неповрежденные районы, строительство временных

водоотводных каналов, укрепления береговых линий и прочее.

В методических рекомендациях по созданию и применению нештатных аварийно-спасательных формирований (НАСФ) приведен состав применяемой техники, из которого можно выделить пять основных видов машин, а именно: бульдозеры, экскаваторы, погрузчики, автокраны и грузовые автомобили [20].

Анализ продаж дорожно-строительных машин (ДСМ) в период с 2013 по 2023 г. позволил определить их виды, наиболее востребованные отраслью. При этом по данным Ассоциации европейского бизнеса (рисунок 1) количество проданных в РФ экскаваторов-погрузчиков достигло 32 340 ед., что составляет 25% от всех проданных ДСМ за указанный период¹.

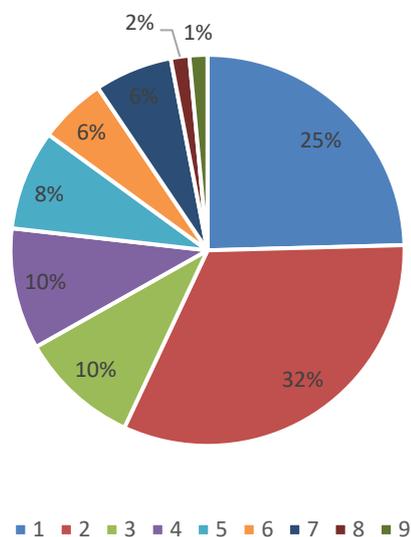


Рисунок 1 – Доли проданных в России ДСМ

в период с 2013 по 2023 г.:

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

Источник: составлено автором.

Figure 1 – Shares of road construction machines sold in Russia in the period from 2013 to 2023:

1 – backhoe loaders; 2 – crawler excavators;

3 – skid steer loaders; 4 – wheel loaders;

5 – crawler tractors;

6 – wheel excavators; 7 – self-propelled graders;

8 – articulated dump trucks; 9 – rigid frame dump trucks

Source: compiled by the author.

¹ Пресс-релизы Ассоциации европейского бизнеса по продажам новой строительной техники в период с 2013 по 2023 г.: [aebrus.ru]. 2016. URL: https://aebrus.ru/ru/media/press-releases/?SECTION_ID=1342 (дата обращения: 15.07.2024).

Учитывая такую динамику насыщения парков ДСМ экскаваторами-погрузчиками, можно предполагать, что они будут оставаться одним из основных видов техники в составе НАСФ.

Таким образом, данное исследование направлено на определение критических значений параметров водной преграды, которые обеспечивают эффективное и безопасное преодоление водных препятствий полноприводным экскаватором-погрузчиком с равновеликими колесами, с учетом влияния гидродинамического давления на его движение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта для создания математической модели движения ТТМ через водную преграду вброд предлагается выбрать полноприводный экскаватор-погрузчик с равновеликими колесами.

В основу построения расчетных схем движения экскаватора-погрузчика по дну водной преграды положена модель его прямолинейного движения по недеформируемому (слабodeформируемому) основанию – заиленной твердой опорной поверхности. При этом

учитываются выталкивающее воздействие водной среды, поперечное и продольное гидродинамические сопротивления (рисунок 2).

Условные обозначения, принятые на рисунке 2: $Ц_б$ – геометрический центр продольной (боковой) проекции, погруженной в воду части автомобиля; $Ц_т$, $Ц_в$ – центры тяжести и водоизмещения соответственно; $h_{бр}$ – глубина водной преграды (брода), м; L – база автомобиля, м; $l_{цт}$ – расстояние от вертикальной плоскости задней оси автомобиля до его центра тяжести и центра водоизмещения, м; $h_{от}$ – высота транспортного положения отвала, м; $B_к$ – ширина колеи экскаватора-погрузчика, м; $q_{лоб}$ – распределенная сила лобового сопротивления, Н/м; $P_т$ – сила тяги, Н; N – нормальная реакция на осях, Н; $M_к$ – крутящий момент, подводимый к колесу, Н·м; P_f – сила сопротивления качению колеса, Н; $P_в$ – выталкивающая сила воды, Н; $P_{бок}$ – сила бокового давления водного потока на борт автомобиля, Н; $P_{лоб}$ – сила лобового гидродинамического сопротивления, Н; S – сила сопротивления боковому скольжению, Н, $q_{лоб}$, $q_{бок}$ – лобовая и боковая распределенные силы гидродинамического давления, Н/м.

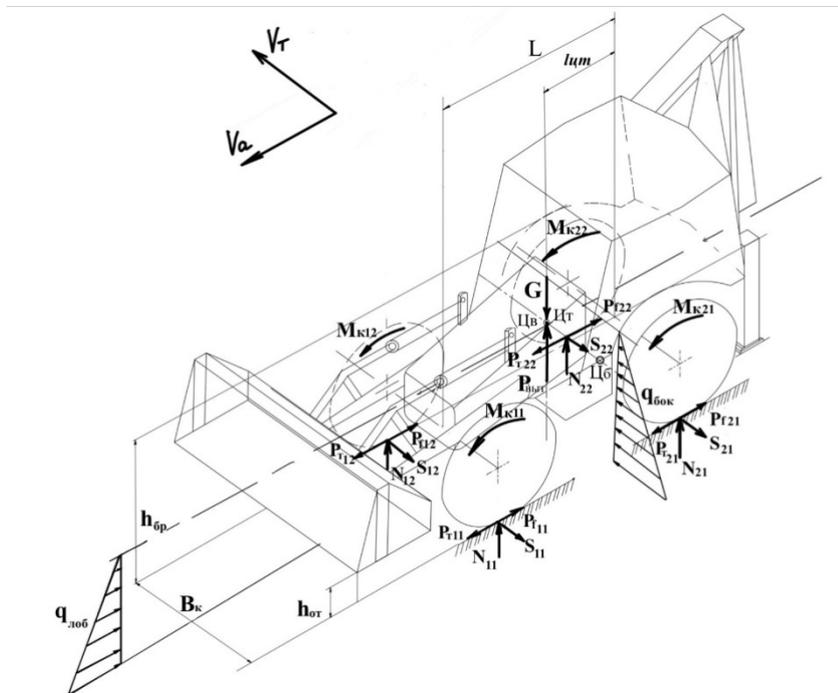


Рисунок 2 – Пространственная расчетная схема для моделирования движения экскаватора-погрузчика вброд по слабodeформируемому основанию
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spatial design scheme for modelling backhoe-loader wading through a weakly deformable base
Source: compiled by the author.

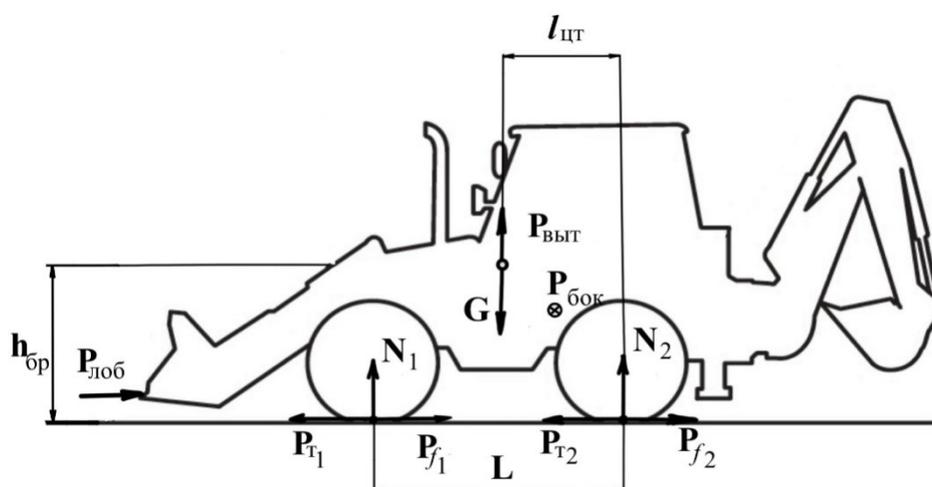


Рисунок 3 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement
 Source: compiled by the author.

Распределённую силу лобового и бокового гидродинамических сопротивлений $q_{\text{лоб}}$, $q_{\text{бок}}$ для упрощения расчетов приведем к сосредоточенным силам лобового и бокового сопротивлений $P_{\text{лоб}}$, $P_{\text{бок}}$:

$$P_{\text{лоб}} = q_{\text{лобmax}} \cdot h_{\text{бp}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{бок}} = q_{\text{бокmax}} \cdot h_{\text{бp}}, \quad (2)$$

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

Сила бокового давления водного потока действует на левый борт машины.

Распределение нормальных реакций по осям экскаватора-погрузчика определялось по плоскостной расчетной схеме рисунка 3.

В соответствии с расчетной схемой зависимости для определения нормальных реакций на осях имеют вид:

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

$$N_2 = \frac{G \cdot (L - l_{\text{цт}}) - P_{\text{выт}} \cdot (L - l_{\text{цт}}) + P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{L}, \quad (4)$$

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

Распределение нормальных реакций по бортам экскаватора-погрузчика определялось по плоскостным расчетным схемам рисунков 4 и 5.

Нагрузки на переднюю и заднюю оси машины G_1 и G_2 численно равны N_1 и N_2 .

В соответствии с расчетными схемами рисунков 4 и 5 нормальные реакции на колесах передней оси для каждого борта определяются выражениями:

$$N_{11} = \frac{G_1 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}, \quad (5)$$

$$N_{12} = \frac{G_1 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}. \quad (6)$$

Нормальные реакции на колесах задней оси для каждого борта:

$$N_{21} = \frac{G_2 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}, \quad (7)$$

$$N_{22} = \frac{G_2 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}. \quad (8)$$

Суммарная выталкивающая сила, действующая на смоченную поверхность машины, согласно закону Архимеда, равна весу объема вытесняемой машиной воды, т.е.

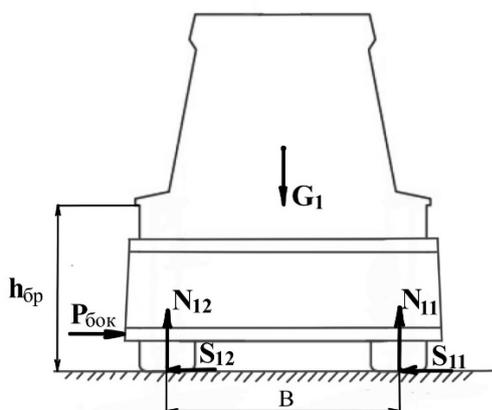


Рисунок 4 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд (вид спереди)
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement (front view)
Source: compiled by the author.

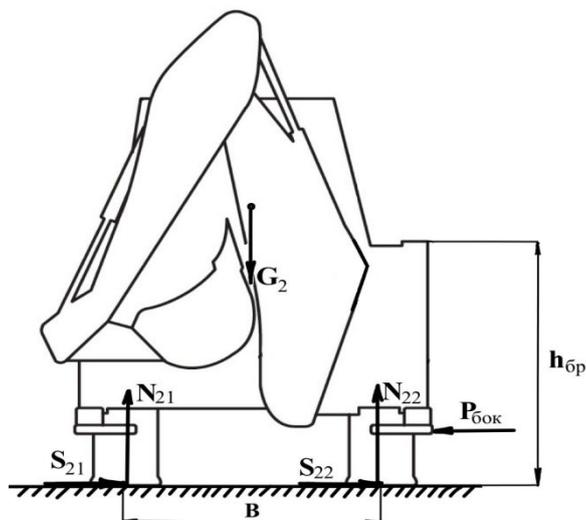


Рисунок 5 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд (вид сзади)
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement (rear view)
Source: compiled by the author.

$$P_B = \rho_B \cdot V_{\Pi} \cdot g, \tag{9}$$

где ρ_B – плотность воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с².

Внешняя поверхность корпуса экскаватора-погрузчика представляет собой сложную поверхность, изменяющуюся по всем трем измерениям (длине, высоте и ширине). Для ясного и точного представления об обводах экскаватора-погрузчика была создана его 3D-модель в масштабе 1:100 на основе прототипа модели JCB 4CX полной массы 8,66 т и разработана расчетная схема сечения тела машины тремя плоскостями. За основные плоскости проекций сечения приняты три взаимно-перпендикулярные плоскости (рисунок 6)²:

- диаметральная (продольная);
- модель-шпангоута (поперечная);
- плоскость грузовой ватерлинии (горизонтальная).

Определение подводного объема экскаватора-погрузчика проводилось на различных глубинах погружения методом имитационного моделирования с помощью перемещения плоскостей в позиции, соответствующие каждой из пяти заданных контрольных глубин погружения. Значения подводного объема и выталкивающей силы для контрольных параметров глубины затопления приведены в таблице 1.

Сила поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления определялась по формуле³

$$P_{\text{лоб}} = 0,5 \cdot K_L \cdot \rho_B \cdot F_L \cdot V_a^2, \tag{10}$$

где K_L – коэффициент лобового гидродинамического сопротивления;

F_L – площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины, м²;

V_a – скорость движения экскаватора-погрузчика, м/с.

² Редькин М.Г. Плавающие колесные и гусеничные машины. М.: Воениздат, 1966. 200 с.

³ Степанов А.П. Конструирование и расчет плавающих машин. М.: Машиностроение, 1983. 197 с., ил.

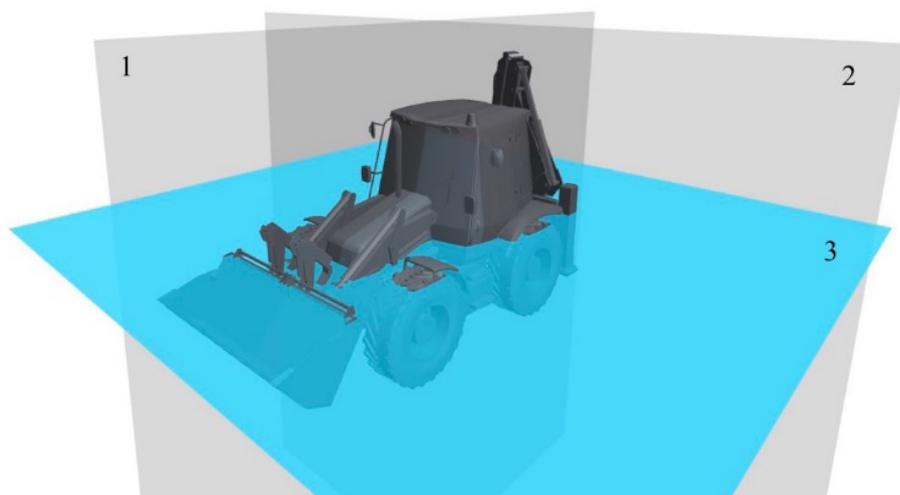


Рисунок 6 – Основные плоскости проекций расчетной схемы
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Main projection planes of the design scheme
 Source: compiled by the author.

Результаты определение подводного объема экскаватора-погрузчика методом имитационного моделирования
 Источник: составлено автором.

Table 1
 Results of determining the underwater volume of the backhoe- loader by simulation modelling method
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
Изображение					
Объем затопленной части машины, м³	1,82	3,06	8,50	10,50	11,84
Выталкивающая сила, Р _в , Н	17800,3	29928,0	83133,4	102596,4	115819,5

Для определения лобового гидродинамического сопротивления необходимо установить скорости движения экскаватора-погрузчика при преодолении водных преград. Поскольку водные преграды вброд рекомендовано преодолевать на низких скоростях, для расчетов

принято движение на 1-й и 2-й передачах. Для подбора значений скоростей были отобраны 11 моделей экскаваторов-погрузчиков с равновеликими колесами. Значения их скоростей на 1-й и 2-й передачах приведены в таблице 2.

Таблица 2
Скорости движения экскаваторов-погрузчиков на низших передачах
Источник: составлено автором.

Table 2
Movement speeds of backhoe-loaders in low gears
Source: compiled by the author.

Модель экскаватора-погрузчика	Скорость	
	1-я передача, м/с	2-я передача, м/с
Shamnon 388H NEW	1,38	2,78
ATLET	1,67	3,33
Liu Gong CLG 777 A-S	1,83	3
MST M544	1,7	2,8
JCB 4CX	1,38	2,58
Komatsu WV97S-5E0	1,8	3,05
XGMA XG 765H-4TX	1,67	3,33
CAT 434	1,67	2,78
New Holland B115B	1,72	3,22
Terex 970 Elite	1,72	3,22
Case 695 SV	1,67	2,28
Среднее значение	1,655	2,942

Все указанные модели экскаваторов-погрузчиков обладают 4-ступенчатой коробкой передач с близким диапазоном скоростей. Средние значения скоростей движения V_a , использованные для дальнейшего расчета, составили: для 1-й передачи $V_1=1,655$ м/с, для 2-й передачи $V_2=2,942$ м/с.

Коэффициент поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления K_l для теоретического расчета был взят равным 1,0 на основании данных⁴, как среднее значение для двухосного автомобиля типа 4x4 грузоподъемностью 4,0 т при скорости движения 1,65 м/с для уровней брода 1, 1,5 и 2 м. Для скорости движения 2,9 м/с для уровней брода 1, 1,5 и 2 м и 1,2 среднее значение для такого автомобиля составляет 1,2.

Площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины F_l определялась на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе Sharp3D. При заданных глубинах погружения она составила соответственно (таблица 3).

Сила давления течения водной преграды на продольную (боковую) поверхность экскаватора-погрузчика определялась по формуле

$$P_{бок} = 0,5 \cdot K_6 \cdot \rho_B \cdot F_6 \cdot V_B^2, \quad (11)$$

где K_6 – коэффициент продольного (бокового) гидродинамического сопротивления;

F_6 – площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля, м²;

V_B – скорость течения водного потока, м/с.

Площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля определялась на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе Sharp3D и составила для каждой из контрольных глубин (таблица 4).

Коэффициенты продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для теоретического расчета были взяты как среднее значение для двухосного автомобиля при глубине водной преграды 1, 1,5 и 2 м для скоростей водного потока, представленных в таблице 5⁴.

Влияние бокового течения на движение машины требует учета проекций теоретической скорости на оси, параллельную и перпендикулярную направлению потока, представленные на рисунке 7. Это обусловлено тем, что фактическая скорость движения машины в продольном направлении будет меньше теоретической, особенно при соизмеримости скорости потока и теоретической скорости машины.

⁴ Добромиров В.Н. Автомобили двойного назначения. Основы теории специальных свойств. М.: Изд. ООО «МП Глобал-Концепт», 2000. 225 с.

Таблица 3
Площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины для пяти заданных глубин водной преграды
 Источник: составлено автором.

Table 3
Area of the transverse (frontal) projection of the submerged part of the machine for five given water depths
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
$F_{л}, м^2$	0,81	0,96	2,87	3,18	4,83

Таблица 4
Площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля для пяти заданных глубин водной преграды
 Источник: составлено автором.

Table 4
Area of the longitudinal (lateral) projection of the machine part submerged in water for five given depths of the water obstacle
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
$F_{б}, м^2$	1,65	1,89	4,83	7,24	7,88

Таблица 5
Коэффициенты продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для различных скоростей водного потока
 Источник: составлено автором.

Table 5
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag coefficients for different water flow velocities
 Source: compiled by the author.

Скорость водного потока, м/с	0,5	1	1,5	2	2,5
Коэффициент продольного (бокового) гидродинамического сопротивления	1,6	1,56	1,54	1,6	1,73

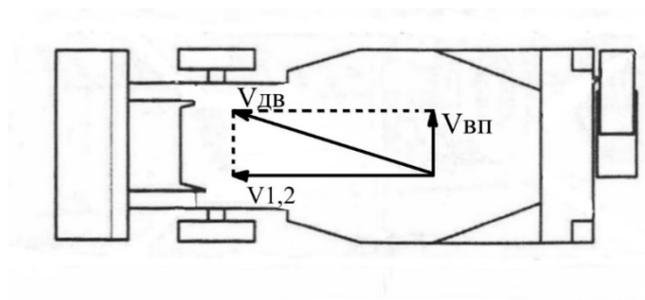


Рисунок 7 – Схема векторов скоростей движения экскаватора-погрузчика
 Источник: составлено автором.

Figure 7 – Scheme of vectors of the backhoe-loader motion speeds
 Source: compiled by the author.

Таблица 6
Значения абсолютной скорости движения с учетом пяти скоростей водного потока для движения на 1-й и 2-й передачах
Источник: составлено автором.

Table 6
Values of absolute motion speed taking into account five water flow velocities for driving in 1st and 2nd gears
Source: compiled by the author.

	$V_{вп1}, \text{ м/с}$	$V_{вп2}, \text{ м/с}$	$V_{вп3}, \text{ м/с}$	$V_{вп4}, \text{ м/с}$	$V_{вп5}, \text{ м/с}$
$V_1, \text{ м/с}$	1,729	1,934	2,234	2,596	2,998
$V_2, \text{ м/с}$	2,984	3,107	3,302	3,557	3,861

Таблица 7
Сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды
Источник: составлено автором.

Table 7
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag force for five water obstacle level reference parameters
Source: compiled by the author.

	$P_{бок}, \text{ Н}$				
При $V_{вп1} = 0,5 \text{ м/с}$	330,11	377,02	965,03	1446,6	1574,4
При $V_{вп2} = 1 \text{ м/с}$	1287,4	1470,4	3763,6	5641,6	6140,3
При $V_{вп3} = 1,5 \text{ м/с}$	2859,6	3266	8359,6	12531	13638
При $V_{вп4} = 2 \text{ м/с}$	5281,8	6032,4	15441	23145	25191
При $V_{вп5} = 2,5 \text{ м/с}$	8923,3	10191	26086	39102	42559

Таблица 8
Сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды для движения на 1-й и 2-й передачах
Источник: составлено автором.

Table 8
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag force for five water obstacle level reference parameters for driving in 1st and 2nd gears
Source: compiled by the author.

	$P_{лоб}, \text{ Н}$				
$V_1, \text{ м/с}$	1447,630241	1718,1651	5141,953949	5690,190154	8653,5
$V_2, \text{ м/с}$	5031,837005	5972,192682	17872,9854	19778,60684	30079

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 абсолютной скорости движения машины в водном потоке определяется по зависимости

$$V_{дв} = \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{вп}^2}$$

Значения абсолютной скорости движения, полученные с учетом такой корректировки, приведены в таблице 6.

В соответствии с контрольными параметрами скорости потока была рассчитана сила бокового гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды (таблица 7).

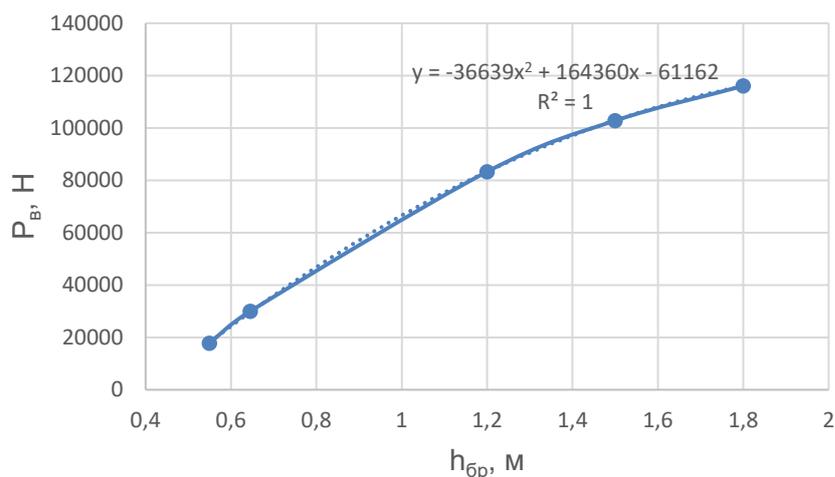


Рисунок 8 – Зависимость выталкивающей силы от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Dependence of the ejection force on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

Поперечное (лобовое) гидродинамическое сопротивление при указанных значениях течения водного потока следующее (таблица 8).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Графическая и аналитическая зависимости выталкивающей силы воды от уровня затопления машины представлены на рисунке 8.

Полагаясь на достаточную корректность использования для расчетов принятых значений была определена сила поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления для пяти заданных глубин брода для движения на 1-й и 2-й передачах со скоростями 1,65 и 2,9 м/с соответственно. Зависимость значения этой силы от глубины брода представлена на рисунке 9.

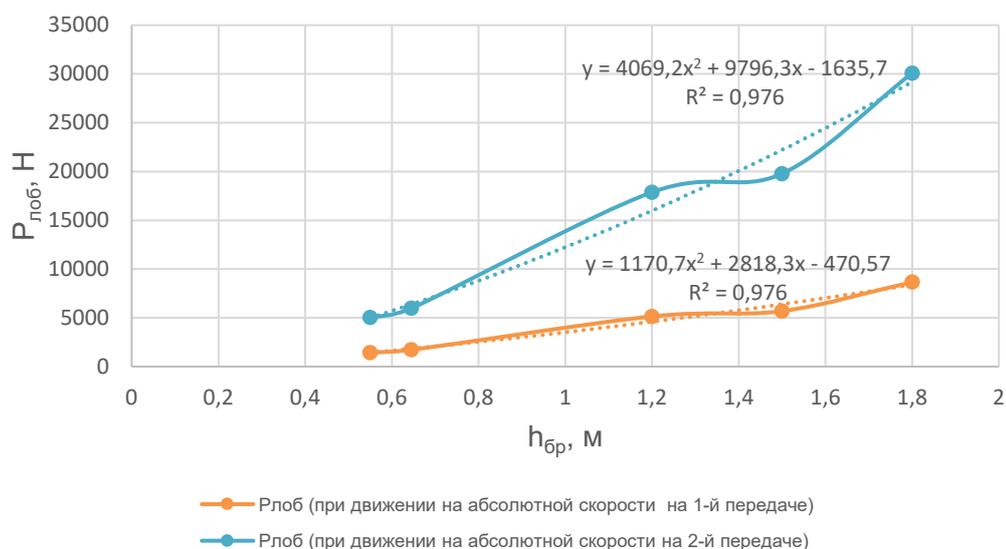


Рисунок 9 – Зависимость поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of transverse (frontal) hydrodynamic resistance on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

Математическая обработка графиков, образованных расчетными значениями, показала возможность их аппроксимации для поперченного (лобового) гидродинамического сопротивления полиномиальными зависимостями второй степени с коэффициентом детерминации 0,976.

На основе рассчитанного лобового сопротивления и выталкивающей силы по зависимостям (4) и (5) были определены нормальные реакции на передней и задней осях и построена их графическая зависимость от глубины затопления машины при движении на 1-й и 2-й передачах (рисунок 10).

Из графика на рисунке 10 видно, что при глубине водного потока 1 м машина теряет управляемость в связи с отрывом передних колес от опорной поверхности, при глубине более 1,2 м нормальные реакции колес на передней и задней осях становятся отрицательными, что говорит о том, что машина под действием выталкивающей силы и лобового гидродинамического сопротивления теряет сцепление с донной опорной поверхностью. Начинается этот процесс при движении на 1-й и 2-й передачах с передней оси на глубине 1,2 м, что может привести к потере управляемости и подвижности экскаватора-погрузчика даже в стоячей воде.

В соответствии с контрольными параметрами скорости потока (см. таблицу 3) была рассчитана сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных уровней брода. Графическая зависимость этой силы от глубины затопления машины представлена на рисунке 11.

Математическая обработка графиков, образованных расчетными значениями, показала возможность их аппроксимации линейными зависимостями с коэффициентом детерминации 0,9846.

Резкое увеличение гидродинамического давления на глубине 1,3 м вызвано появлением дополнительных погруженных в воду боковых поверхностей (переднего отвала и ковша), что скачкообразно увеличивает площадь продольной плоскости, на которую оказывает давление водный поток.

По полученным данным была построена зависимость распределения нормальных реакций по колесам передней и задней осей для левого и правого бортов от силы бокового давления с учетом одновременного воздействия силы лобового сопротивления на двух скоростях движения для пяти скоростей водного потока $V_{\text{вп}}$ (рисунок 12).

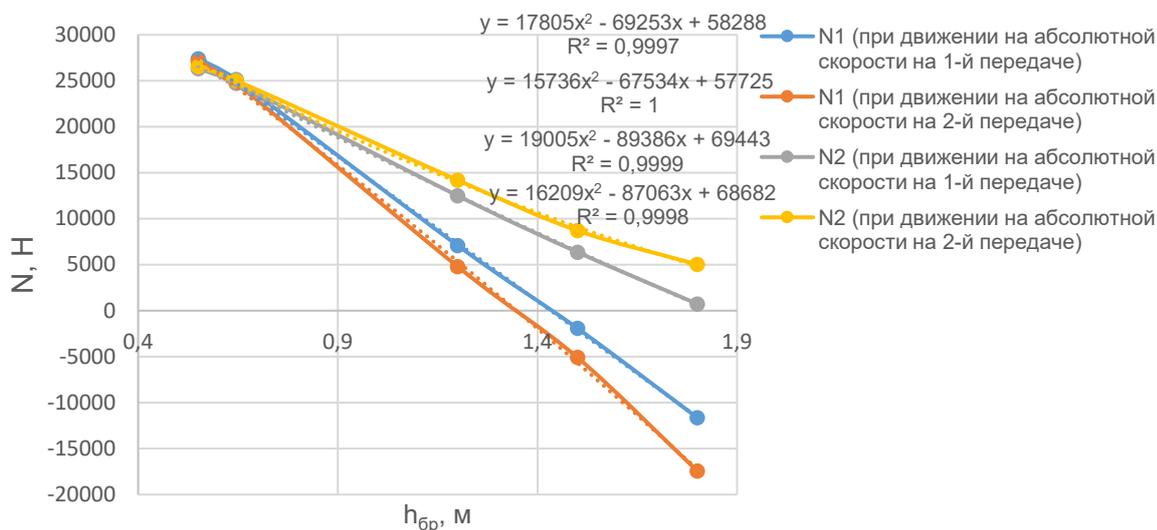


Рисунок 10 – Зависимость нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика от глубины погружения при движении на 1-й и 2-й передачах при наличии бокового течения водного потока
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Dependence of normal reactions on the front and rear axles of the backhoe-loader on the depth of immersion moving in 1st and 2nd gears in the presence of lateral flow of the water stream
Source: compiled by the author.

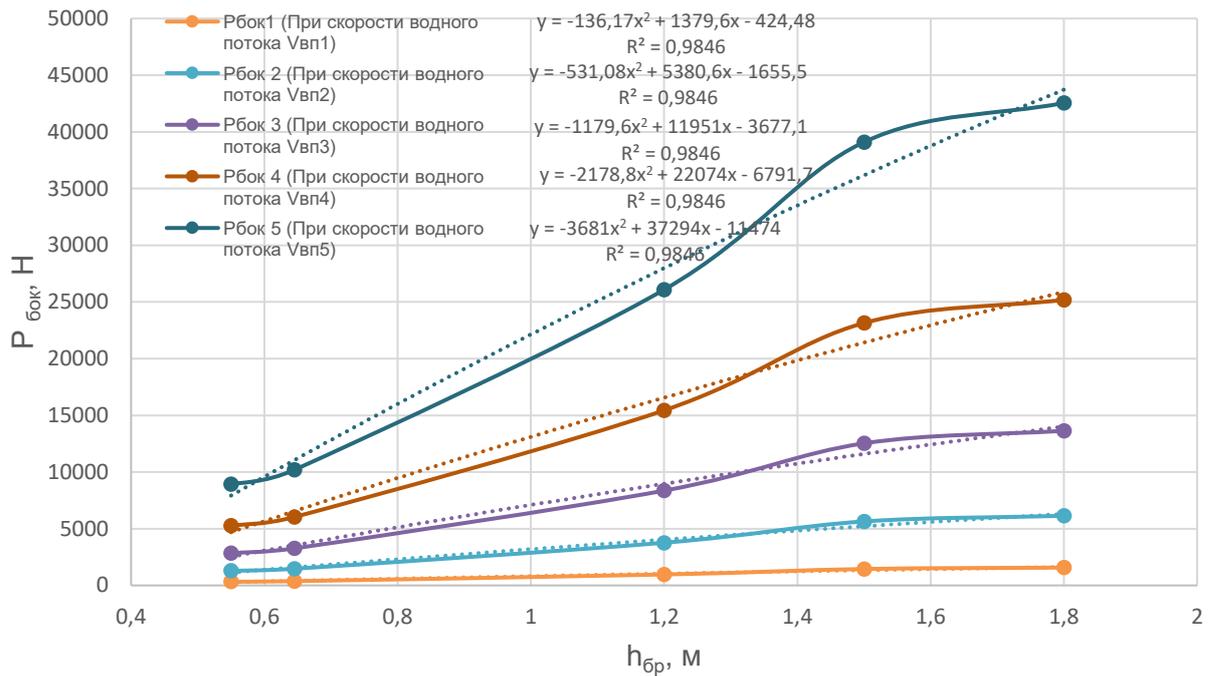


Рисунок 11 – Зависимость продольного (бокового) гидродинамического давления от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Dependence of longitudinal (lateral) hydrodynamic pressure on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

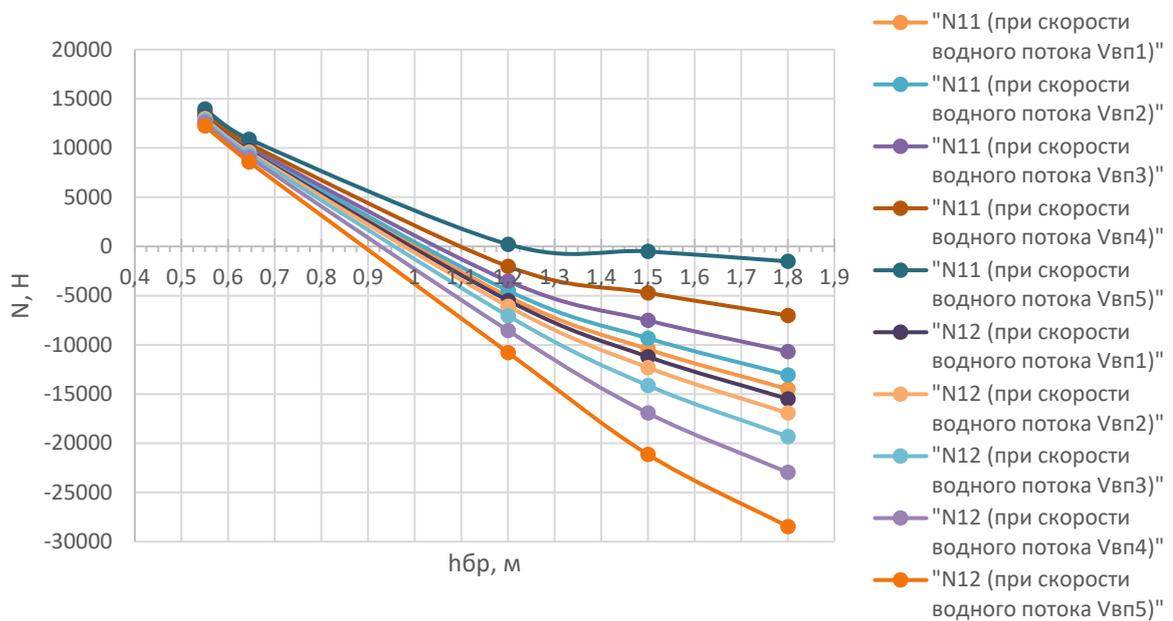


Рисунок 12 – Зависимость распределения нормальных реакций передней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче
Источник: составлено автором.

Figure 12 – Dependence of the distribution of normal front axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 1st gear
Source: compiled by the author.

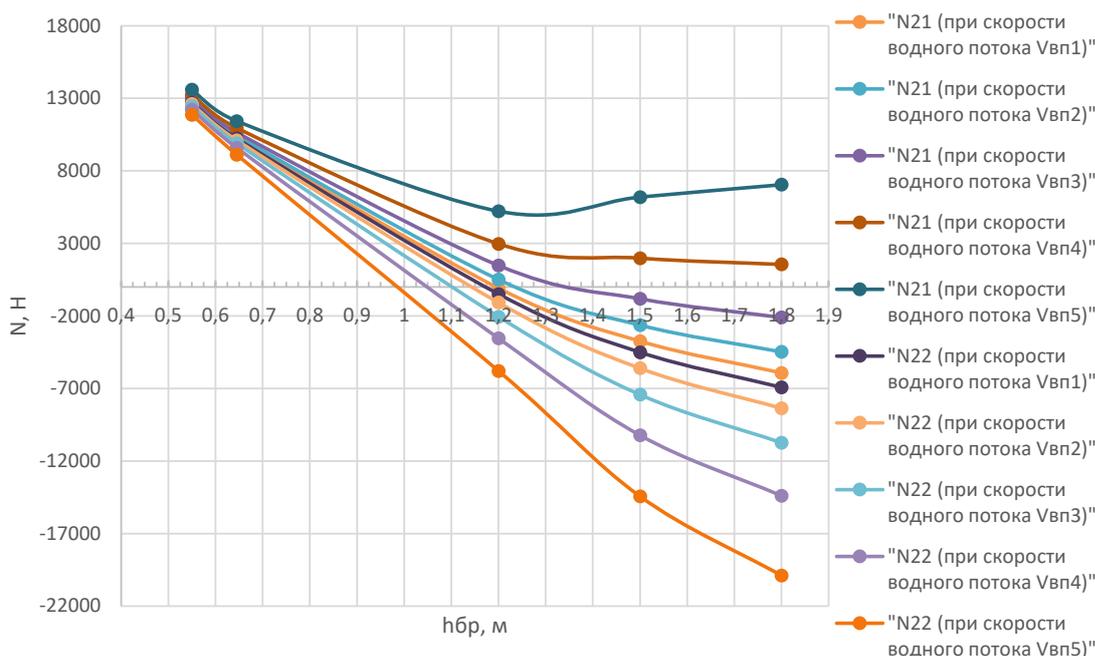


Рисунок 13 – Зависимость распределения нормальных реакций задней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче
 Источник: составлено автором.

Figure 13 – Dependence of distribution of normal rear axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 1st gear
 Source: compiled by the author.

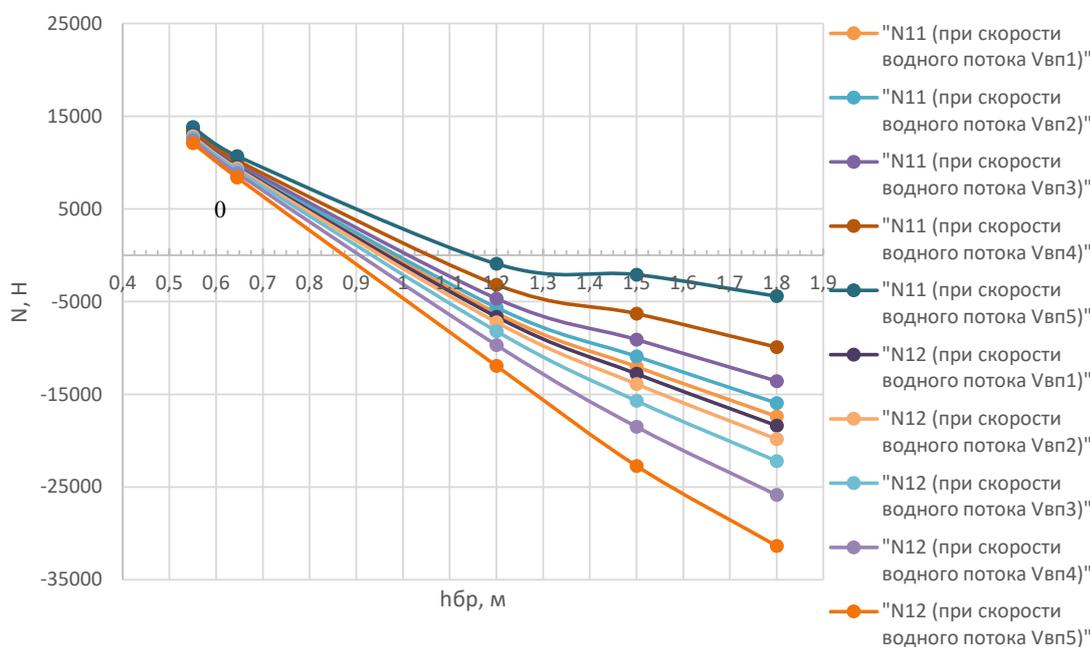


Рисунок 14 – Зависимость распределения нормальных реакций передней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче
 Источник: составлено автором.

Figure 14 – Dependence of the distribution of normal front axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 2nd gear
 Source: compiled by the author.

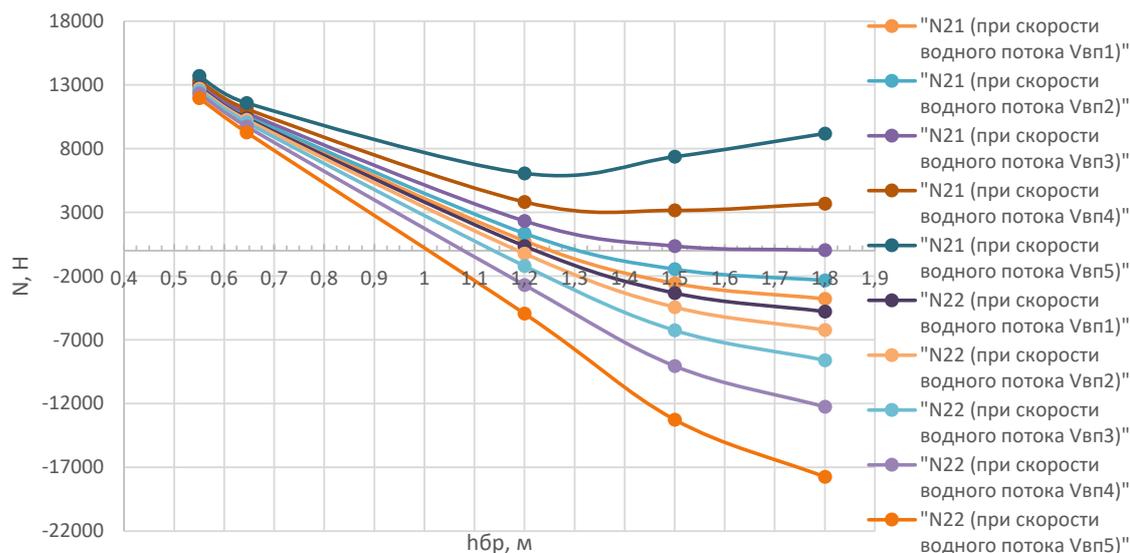


Рисунок 15 – Зависимость распределения нормальных реакций задней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче
Источник: составлено автором.

Figure 15 – Dependence of distribution of normal rear axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 2nd gear
Source: compiled by the author.

Таблица 9

Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 1-й передаче
Источник: составлено автором.

Table 9

Depths of wheel adhesion loss of the front and rear axles of backhoe-loader when driving in 1st gear
Source: compiled by the author.

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, м				
1-я ось, правое колесо, N11	1	1,025	1,075	1,1	1,2
1-я ось, левое колесо, N12	0,985	0,975	0,95	0,925	0,885
2-я ось, правое колесо, N21	1,2	1,2375	1,3375	-	-
2-я ось, левое колесо, N22	1,175	1,1375	1,1	1,05	0,97625

Из рисунков 12,13,14 и 15 видно, что при преодолении экскаватором-погрузчиком водной преграды глубиной от 0,55 до 0,645 м нагрузка между левым и правым бортами распределяется практически равномерно при движении на 1-й и 2-й передачах и всех скоростях водного потока. 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 1,2 м возникает резкое перераспределение нагруз-

ки 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 9 и 10 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.

Таблица 10

Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 2-й передаче
Источник: составлено автором.

Table 10

Depths of wheel adhesion loss of the front and rear axles of backhoe-loader when driving in 2nd gear
Source: compiled by the author.

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, м				
1-я ось, правое колесо, N11	0,975	0,975	1,025	1,05	1,15
1-я ось, левое колесо, N12	0,9625	0,95	0,925	0,9	0,875
2-я ось, правое колесо, N21	1,25	1,3	1,65	-	-
2-я ось, левое колесо, N22	1,225	1,185	1,1375	1,075	1,025

Максимальная глубина, при которой происходит потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси) составляет 0,985 м при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче при скорости водного потока равной 0,5 м/с, минимальная глубина – 0,885 м при скорости водного потока 2,5 м/с.

Опрокидывание машины возникает на глубине 1,05 м для скорости водного потока 2 м/с и 0,976 м для скорости водного потока 2,5 м/с, поскольку происходит полный отрыв всех колес левого борта и переднего правого колеса, при этом нормальные реакции на заднем правом колесе остаются положительными.

Максимальная глубина, при которой происходит потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси), составляет 0,9625 м при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче при скорости водного потока равной 0,5 м/с, минимальная глубина – 0,875 м при скорости водного потока 2,5 м/с.

Опрокидывание машины возникает на глубине 1,025 м для скорости водного потока 2,5 м/с, поскольку происходит полный отрыв всех колес левого борта и переднего правого колеса, при этом нормальные реакции на заднем правом колесе остаются положительными.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют оценить влияние поперечного (лобового) и продольного (бокового) гидродинамического давления на устойчивость прямолинейного движения экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд и определить безопасные условия применения машины в зоне затопления в зависимости от глубины и скорости течения водной преграды.

Из полученных расчетных и графических данных следует, что движение экскаватора-погрузчика возможно при глубине водного потока до 1,2 м, поскольку при большей глубине машина теряет подвижность в связи с отрывом колес передней и задней осей от опорной поверхности под воздействием выталкивающей силы воды и сил лобового и бокового гидродинамического давления.

Для уточнения полученных расчетных данных необходимо провести экспериментальное исследование, например на масштабной физической модели, по уточнению коэффициентов обтекаемости экскаватора-погрузчика, оказывающих влияние на расчет поперечного и продольного гидродинамических сопротивлений. Уточненные результаты необходимы для создания корректной методики определения предельных параметров затопления экскаваторов-погрузчиков для обеспечения безопасного и эффективного выполнения работ в зонах наводнений, а также для последующего совершенствования их конструкции с позиции обеспечения работоспособности в водной среде при уровне погружения, превышающем определенный в настоящее время заводом-изготовителем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dong B., Xia J., Li Q., & Zhou M. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the "7.20" flood event in Zhengzhou, China // International journal of disaster risk reduction. 2022. Т. 80. P. 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103205>
2. Zhang M., Wang J. Global flood disaster research graph analysis based on literature mining // Applied Sciences. 2022. Т. 12. №. 6. <https://doi.org/10.3390/app12063066>

3. Lazzarin T., Viero D.P., Molinari D., Ballio F., & Defina A. Flood damage functions based on a single physics-and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity // *Journal of Hydrology*. 2022. T. 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127485>
4. Borowska-Stefańska M., Bartnik A., Dulebenets M. A., Kowalski M., Sahebgharani A., Tomalski P., & Wiśniewski S. Changes in intra-city transport accessibility accompanying the occurrence of an urban flood // *Transportation research part D: transport and environment*. 2024. T. 126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104040>
5. He H., Li R., Pei J., Bilodeau, J.P., & Huang G. Current overview of impact analysis and risk assessment of urban pluvial flood on road traffic // *Sustainable Cities and Society*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104993>
6. Gangwal U., Siders A.R., Horney J., Michael H.A., & Dong S. Critical facility accessibility and road criticality assessment considering flood-induced partial failure // *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2023. T. 8. №. sup1. P. 337-355. <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2149184>
7. Toathom T., Champrasert P. Vehicle Route Planning for Relief Item Distribution under Flood Uncertainty // *Applied Sciences*. 2024. T. 14. №. 11. P. 4482. <https://doi.org/10.3390/app14114482>
8. Bocanegra R.A., Francés F. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding // *Journal of flood risk management*. 2021. T. 14. №. 4. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12738>
9. Hu X., Li J., Wang W., & Fang X. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations // *Journal of Hydrology*. 2023. T. 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129525>
10. Shu C., Xia J., Falconer R.A., & Lin, B. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters // *Journal of hydraulic research*. 2011. T. 49. №. 6. P. 709-717. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616318>
11. Xia J., Teo F.Y., Lin B., & Falconer R.A. Formula of incipient velocity for flooded vehicles // *Natural Hazards*. 2011. T. 58. P. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x>
12. Teo F.Y., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows // *International journal of river basin management*. 2012. T. 10. №. 2. P. 149-160. <https://doi.org/10.1080/15715124.2012.674040>
13. Teo F.Y., Liew Y.S., Falconer R.A., & Lin, B. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles // *IAHR World Congress, Chengdu (China)*. 2013.
14. Xia J., Falconer R.A., Xiao X., & Wang Y. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies // *Natural hazards*. 2014. T. 70. P. 1619-1630. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0889-2>
15. Arrighi C., Alcèrrec-Huerta J. C., Oumeraci H., & Castelli F. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles // *Journal of Fluids and Structures*. 2015. T. 57. P. 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010>
16. Kramer M., Terheiden K., Wieprecht S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings // *International journal of disaster risk reduction*. 2016. T. 17. P. 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.003>
17. Martinez-Gomariz E., Gomez M., Russo B., & Djordjević S. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding // *Urban Water Journal*. 2017. T. 14. №. 9. P. 930-939. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301501>
18. Pregolato M., Ford A., Wilkinson S.M., & Dawson R.J. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function // *Transportation research part D: transport and environment*. 2017. T. 55. P. 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>
19. Добромиров В.Н. Методика оценки проходимости автотранспортных средств при преодолении водных преград вброд // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. №. 1. С. 188–191.
20. Магдина Е.Р., Добромиров В.Н. Проблемные вопросы применения дорожно-строительных машин в зонах затопления // *Русский инженер*. 2023. № 3(80). С. 40–43.

REFERENCES

1. Don, B., Xia J., Li Q., & Zhou M. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the “7.20” flood event in Zhengzhou, China. *International journal of disaster risk reduction*. 2022; T. 80: 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103205>
2. Zhang M., Wang J. Global flood disaster research graph analysis based on literature mining. *Applied Sciences*. 2022; T. 12. №. 6. <https://doi.org/10.3390/app12063066>
3. Lazzarin T., Viero D. P., Molinari D., Ballio F., & Defina A. Flood damage functions based on a single physics-and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity. *Journal of Hydrology*. 2022; T. 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127485>
4. Borowska-Stefańska M., Bartnik A., Dulebenets M. A., Kowalski M., Sahebgharani A., Tomalski P., & Wiśniewski S. Changes in intra-city transport accessibility accompanying the occurrence of an urban flood. *Transportation research part D: transport and environment*. 2024; T. 126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104040>
5. He H., Li R., Pei J., Bilodeau J. P., & Huang G. Current overview of impact analysis and risk assessment of urban pluvial flood on road traffic. *Sustainable Cities and Society*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104993>
6. Gangwal U., Siders A. R., Horney J., Michael H.A., & Dong S. Critical facility accessibility and road criticality assessment considering flood-induced partial failure. *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2023; T. 8. №. sup1: 337-355. <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2149184>

7. Toathom T., Champrasert P. Vehicle Route Planning for Relief Item Distribution under Flood Uncertainty. *Applied Sciences*. 2024; T. 14. №. 11: 4482. <https://doi.org/10.3390/app14114482>
8. Bocanegra R.A., Francés F. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding. *Journal of flood risk management*. 2021. T. 14. №. 4. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12738>
9. Hu X., Li J., Wang W., & Fang X. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations. *Journal of Hydrology*. 2023; T. 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129525>
10. Shu C., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of hydraulic research*. 2011; T. 49. №. 6: 709-717. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616318>
11. Xia J., Teo F.Y., Lin B., & Falconer R.A. Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*. 2011; T. 58: 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x>
12. Teo F.Y., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International journal of river basin management*. 2012; T. 10. №. 2: 149-160. <https://doi.org/10.1080/15715124.2012.674040>
13. Teo F.Y., Liew Y.S., Falconer R.A., & Lin B. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles. *IAHR World Congress, Chengdu (China)*. 2013.
14. Xia J., Falconer R.A., Xiao X., & Wang Y. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural hazards*. 2014; T. 70: 1619-1630. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0889-2>
15. Arrighi C., Alcérreca-Huerta J. C., Oumeraci H., & Castelli F. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles. *Journal of Fluids and Structures*. 2015; T. 57: 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010>
16. Kramer M., Terheiden K., Wieprecht S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings. *International journal of disaster risk reduction*. 2016; T. 17: 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.003>
17. Martinez-Gomariz E., Gomez M., Russo B., & Djordjević S. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*. 2017; T. 14. №. 9: 930-939. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301501>
18. Pregolato M., Ford A., Wilkinson S.M., & Dawson R.J. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation research part D: transport and environment*. 2017; T. 55: 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>
19. Dobromirov V.N. Methodology of evaluating motor vehicles' cross-country capability at overcoming water obstacles fording. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 1: 188-191. (in Russ.)
20. Magdina E.R., Dobromirov V.N. Problematic issues of the use of road construction machines in flood zones. *Russian Engineer*. 2023; 3(80). 3: 40-43. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Магдина Елизавета Ростиславовна – ассистент кафедры судебных экспертиз, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9784-8379>; **Scopus Author ID:** 57219855981; **Researcher ID:** AAC-6375-2022; **SPIN-код:** 1603-6470, e-mail: elisluk97@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Magdina Yelizaveta R. – Assistant of the Forensic Expertise Department, postgraduate student of the Department of Land Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, Russia, 190005), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9784-8379>; **Scopus Author ID:** 57219855981; **Researcher ID:** AAC-6375-2022; **SPIN-code:** 1603-6470, e-mail: elisluk97@mail.ru