

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_63

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ШАССИ МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ В БЕРЕГОВЫХ ЗОНАХ

А.М. Беляев

ORCID: 0000-0001-8040-5806 e-mail: myhome2010@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Разработана методика расчета подвижности и эффективности мобильных автономных комплексов (МАК) при движении по песчано-гравийным берегам с учетом изменчивости характеристик опорных оснований на пути движения шасси, а также режимов движения. Уточнена модель встречаемости песчано-гравийных опорных поверхностей с учетом анализа реальных траекторий движения МАК вдоль береговой линии и выполнения им технологических операций. Проведены и экспериментально подтверждены расчеты подвижности и эффективности МАК. По разработанной методике проведены экспериментальные исследования микстов по определению параметров «нагрузка-осадка», а также сдвиговых характеристик с учетом разного процентного состава снежной и минеральной составляющих, оценено влияние окружающей температуры и повторной нагрузки. Разработаны новые математические модели. Проведены теоретические расчеты по определению влияния параметров шасси МАК на сопротивление движения при движении по микстам.

Ключевые слова: мобильный автономный комплекс, подвижность, эффективность, микст, береговая зона.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беляев, А.М. Разработка методики расчета и выбор параметров шасси мобильных автономных комплексов, обеспечивающих эффективность движения в береговых зонах // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №4. С. 63-80. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_63

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS AND SELECTION OF CHASSIS PARAMETERS OF MOBILE AUTONOMOUS COMPLEXES THAT ENSURE THE EFFICIENCY OF MOVEMENT IN COASTAL ZONES

А.М. Belyaev

ORCID: 0000-0001-8040-5806 e-mail: myhome2010@mail.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A methodology has been developed for calculating the mobility and efficiency of mobile autonomous complexes (MAC) when moving along sandy and gravel shores, taking into account the variability of the characteristics of the support bases on the path of the chassis, as well as the driving modes. The model of the occurrence of sand-gravel bearing surfaces is refined, taking into account the analysis of the real trajectories of the MAC movement along the coastline and the execution of technological operations by it. Calculations of the mobility and efficiency of the MAC have been carried out and experimentally confirmed. According to the developed methodology, experimental studies of mixes were carried out to determine the "load-sediment" parameters, as well as shear characteristics, taking into account different percentages of snow and mineral components, the influence of ambient temperature and repeated loading was estimated. New mathematical models have been developed. Theoretical calculations have been carried out to determine the influence of the parameters of the chassis of the MAC on the resistance of movement when driving on mixes.

Key words: mobile autonomous complex, mobility, efficiency, mix, coastal zone.

FOR CITATION: Belyaev A.M. Development of calculation methods and selection of chassis parameters of mobile autonomous complexes that ensure the efficiency of movement in coastal zones. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №4. С. 63-80. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_63

Введение

Основными условиями движения шасси мобильных автономных комплексов (МАК), необходимых для мониторинга прибрежных территорий, являются песчаные и песчано-гравийные опорные основания, на долю которых приходится порядка 70 % береговых зон [1, 2]. Физико-механические характеристики грунта берегов зависят от удаления от уреза воды, а на встречаемость данных параметров на пути следования МАК влияют режимы движения. Траектория и условия движения определяются тем, что шасси большее время будет двигаться по берегу с лучшим тягово-сцепными свойствами. Передвижение по берегам с низкими тягово-сцепными свойствами будет обусловлено только спецификой выполняемых технологических операций, наличием дискретных препятствий типа больших булыжников и деревьев, размывов, крутых откосов и пр. Поэтому важно оценивать проходимость, подвижность и эффективность МАК в береговой зоне с учетом вероятности встречаемости песчано-гравийных опорных поверхностей с учетом анализа реальных траекторий движения шасси.

В зимнее время года МАК будет передвигаться по снегу. Вопрос передвижения специальных шасси по снежному полотну пути достаточно подробно изучен в работах представителей нижегородской научно-практической школы транспортного снеговедения [3]. Неизученным остается передвижение МАК в весенний период, когда опорные поверхности представляют собой минерально-ледовые дисперсные смеси зонально-слоистой структуры, т.н. «миксты». При этом в начальный момент времени шасси взаимодействует с неразрушенным опорным основанием, а в дальнейшем движитель взаимодействует с разрушенным. Исследований, рассматривающих миксты именно как смеси грунта и снега, в настоящее время недостаточно. Поэтому необходимо более детально рассмотреть данный вопрос и оценить, как влияет изменение параметров шасси на сопротивление движению в данных условиях.

Постановка задач исследования

Основным объектом для оценки подвижности и эффективности в настоящем исследовании выступает МАК, разработанный научно-исследовательской лабораторией «Моделирование природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [4-9]. На данном шасси были проведены следующие теоретические и экспериментальные исследования.

Анализ береговых зон как полотна пути для специальных шасси показал, что можно выделить следующие типы береговых поверхностей: крутой вертикально обрывистый берег, крутой пологий протяженный склон, по которому невозможно подъехать близко к береговой линии, пологий протяженный берег, расчлененный сетью затонов и малых рек, болотистая местность, а также пологие участки береговой линии. Именно последний тип берега наиболее пригоден для мониторинга с помощью МАК.

Анализ опорных поверхностей береговых зон показал, что преобладающими территориями для передвижения МАК в летний период являются песчаные и песчано-гравийные, в зимнее время – снег, а в переходный период – миксты. Более ранних исследований [1, 2] песчано-гравийных берегов оказалось недостаточно с точки зрения встречаемости условий (вероятности) движения на пути следования МАК, в том числе, с учетом траектории движения и режимов движения (прямолинейное и криволинейное движение).

Анализ физико-механических свойств опорных поверхностей типа микст показал недостаточное исследование данной темы как в теоретическом, так и в практическом аспектах.

Анализ условий движения по снегу показал, что данный вопрос исследован в доста-

точной степени и в настоящей работе исследоваться не будет.

Выявлено, что необходимо провести исследования, связанные с определением вероятностных характеристик, позволяющих определить относительный пробег при движении МАК по характерным участкам берега, а также с учетом режимов движения.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что исследованием процессов взаимодействия движителей с опорным основанием занималась целая плеяда ученых: Я.С. Агейкин, П.В. Аксенов, А.А. Аникин, А.С. Антонов, В.Ф. Бабков, Б.Г. Безбородова, Б.Н. Белоусов, В.В. Беляков, Л.В. Барахтанов, М.Г. Беккер, А.К. Бируля, Н.Ф. Бочаров, Ю.А. Брянский, У.Ш. Вахидов, Н.С. Вольская, Дж. Вонг, В.А. Горелов, В.П. Горячкин, А.И. Гришкевич, В.В. Гуськов, Н.А. Забавников, Г.В. Зимелев, В.В. Кацыгин, Л.А. Кемурджиан, Г.О. Котиев, В.И. Котляренко, Н.Ф. Кошарный, М.К. Кристи, Г.М. Кутьков, А.П. Куляшов, В.В. Ларин, М.Н. Летошнев, А.С. Литвинов, В.С. Макаров, Ю.И. Молев, В.Н. Наумов, В.А. Петрушов, Ю.В. Пирковский, В.Ф. Платонов, А.А. Полунгян, Ю.Л. Рождественский, С.В. Рукавишников, Г.А. Смирнов, А.П. Софиян, М.Н. Троицкая, Н.А. Ульянов, Я.Е. Фаробин, Б.С. Фалькевич, М.П. Чистов, Е.А. Чудаков, В.А. Шапкин, С.Б. Шухман, Н.Н. Яценко и многие другие, а также научные школы МГТУ им. Н.Э. Баумана; ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, МАДИ и многие другие. Поэтому для оценки подвижности и эффективности движения МАК в береговой зоне можно использовать существующие математические модели. При этом необходимо уделить внимание характеристикам полотна пути при движении по песчано-гравийным берегам и опорной поверхности типа микст.

В соответствии с проведенным анализом были сформулированы задачи исследования:

- 1) разработать методику расчета подвижности и эффективности МАК при движении по песчано-гравийным берегам с учетом изменчивости характеристик опорных оснований на пути движения шасси, а также режимов движения;
- 2) уточнить вероятность встречаемости песчано-гравийных опорных поверхностей с учетом анализа реальных траекторий движения МАК вдоль береговой линии и выполнения им технологических операций;
- 3) провести расчеты подвижности и эффективности МАК, а также экспериментально подтвердить проведенные расчеты на реальных образцах техники;
- 4) разработать методику проведения эксперимента и провести экспериментальные исследования микстов по определению параметров «нагрузка-осадка», а также сдвиговых характеристик с учетом разного процентного состава снежной и минеральной составляющих, оценить влияние окружающей температуры, а также повторной нагрузки;
- 5) разработать новую математическую модель описывающую процесс «нагрузка-осадка» для микстов и учитывающую разный процентный состав снежной и минеральной составляющих;
- 6) разработать новую математическую модель описывающую сдвиговые характеристики для микстов и учитывающую разный процентный состав снежной и минеральной составляющих;
- 7) провести теоретические расчеты по определению влияния параметров шасси МАК на сопротивление движения при движении по микстам;
- 8) практически реализовать результаты исследований при создании и совершенствовании существующих конструкций многоосных колесных машин.

Экспериментальные исследования

Для решения поставленных задач исследования были экспериментально изучены физико-механические параметры опорных оснований береговых зон. Исследования были проведены в 2016-2017 гг. на МАК для мониторинга прибрежной зоны в рамках совместных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева и СКБ САМИ ДВО РАН на о. Сахалин [10-14]. Экспериментально изучено сопротивление движению МАК по опорным основаниям береговых зон. На

рис. 2 показана схема определения силы сопротивления [15, 16]. Замеры были проведены для дальнейшей валидации математической модели при имитационном моделировании и настройки ее параметров. Кроме замеров сопротивления, в месте измерений фиксировались физико-механические параметры грунта (рис. 3).

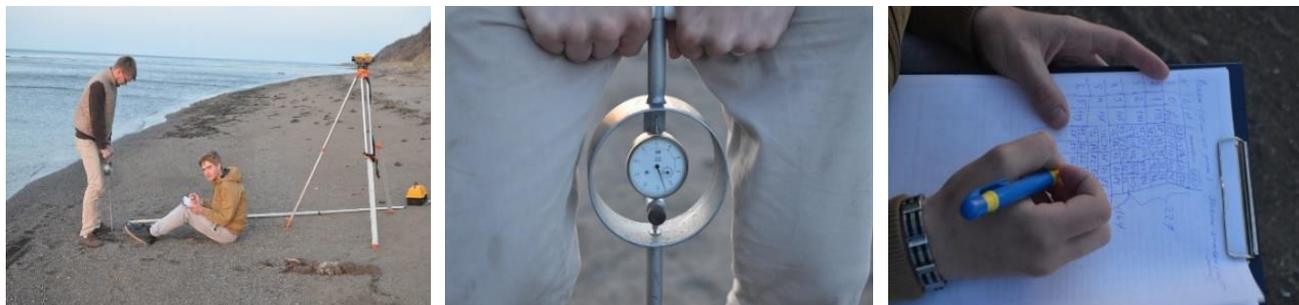


Рис. 1. Замер и запись сопротивления пенетрации

Fig. 1. Measurement and recording of penetration resistance

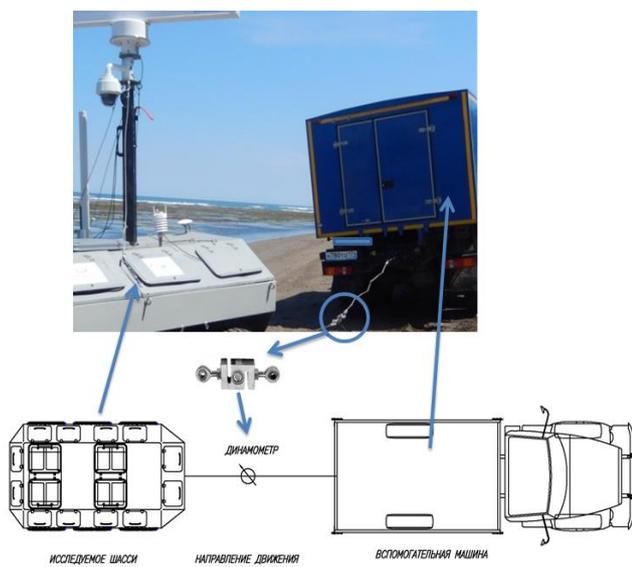


Рис. 2. Схема определения силы сопротивления движения МАК [15, 16]

Fig. 2. The scheme for determining the resistance force of the movement of the MAC [15, 16]



Рис. 3. Фрагмент испытаний. Замер параметров грунта

Fig. 3. A fragment of the tests. Measurement of soil parameters

Также были проведены экспериментальные исследования траектории движения МАК в береговой зоне. Замеренный и наложенный на карту пример траекторий приведен на рис. 4. В результате последующего анализа траекторий движения МАК по протяженности исследуемого пути, по результатам нескольких заездов было установлено, что порядка 90 % траектории движения МАК составляет прямолинейное движение по середине участка берега с хорошими тягово-сцепными свойствами. Также было получено процентное распределение относительной протяженности пробега при прямолинейном и криволинейном движении с учетом движения по разным участкам от удаления от воды.



Рис. 4. Пример траектории движения МАК и характерные фрагменты испытаний

Fig. 4. An example of the trajectory of the MAC and characteristic fragments of the tests

Следующей частью экспериментальных исследований были работы по исследованию физико-механических характеристик минерально-снежных микстов. Специально были подготовлены снежно-песчаные миксты для дальнейшего исследования. Чтобы исключить возможность превращения снега в воду с последующим замерзанием, подготовка микстов проводилась при температуре ниже -20°C . Зима 2020-2021 гг. в Нижегородской области выдалась достаточно снежной и морозной, поэтому испытания проводились в естественных условиях. Это позволило адекватно оценить, как влияет наличие снежного компонента в минеральном без влияния слипания грунта (прилипание грунта при деформации движителем не рассматривалось) и прочих факторов. Для проведения эксперимента было подготовлено 5 мерных емкостей, в которые засыпались равные объемы снега и грунта в следующих соотношениях: 4 части (по 3 л) песка – микст-100; 3 части песка и 1 часть снега – микст-75; 2 части песка и 2 части снега – микст-50; 1 часть песка и 3 части снега – микст-25; 4 части снега – микст-0. Средние значения плотностей снега составили $0,37\text{ г/см}^3$, а песка $1,36\text{ г/см}^3$ [17-19]. Фрагменты определения параметром песка и снега показаны на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Фрагменты определения фракционного состава песка

Fig. 5. Fragments of the determination of the fractional composition of sand



Рис. 6. Определение плотности снега с помощью ВС-43

Fig. 6. Determination of snow density using VS-43

Эксперимент по определению физико-механических характеристик состоял из двух частей. Первая экспериментальная часть состояла в определении характеристики «нагрузка – осадка» с применением ПГ-1 [17, 18]. Вторая часть эксперимента состояла – определение сдвиговых характеристик с применением измерителя коэффициента сцепления портативный ИКСп. [19] На рис. 7 и 8 показаны фрагменты испытаний.

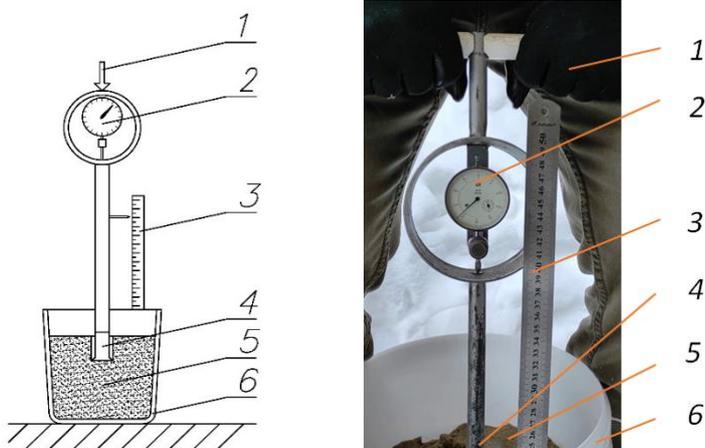


Рис. 7. Схема проведения замера по определению «нагрузки-осадки»
1 – нагрузчитель, 2 – измеритель нагрузки,
3- измеритель осадки, 4 – насадка, 5 – микст,
6 – мерная емкость [17, 18]

Fig. 7. The measurement scheme for the definition of «load-precipitation» 1 – loader, 2 – load meter,
3 – precipitation meter, 4 – nozzle, 5 – mix,
6 – dimensional container [17, 18]



Рис. 8. Фрагмент испытаний по определению коэффициента сцепления с помощью ИКСп [19]

Fig. 8. Fragment of tests to determine the coefficient of adhesion using ICS [19]

В дальнейшем полученные экспериментальные данные были использованы для разработки математических моделей с целью определения подвижности и эффективности при движении по песчано-гравийным опорным основаниям, а также при оценке параметров конструкции шасси МАК.

Математические модели

Ранее была разработана модель цифрового двойника шасси МАК с гусенично-модульным двигателем с помощью *Adams Tracked Vehicle* [15, 16]. Также для того, чтобы замоделировать нужные режимы движения и оценить сопротивление движению при прямолинейном и криволинейном движении шасси, было предложено оценивать движение МАК по «С» – образной траектории с 5 характерными участками: участок 1 – трогание и разгон до заданной скорости; участок 2 – вхождение в поворот; участок 3 – установившееся криволинейное движение с заданным радиусом; участок 4 – выход из поворота; участок 5 – прямолинейное установившееся движение [15, 16]. Разработанная модель позволяет при моделировании фиксировались необходимые параметры, в том числе: моменты и мощности на ведущих звездах, буксование, положение, скорость и ускорение центра масс шасси и др. Также аналогичные работы были проведены для двух вариантов шасси для песчаного и песчано-гравийного опорного основания. Для отладки модели МАК было проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных описанных ранее. В результате расхождения составили 4,3-8 % для колесного варианта шасси и 0,4-1,5 для гусенично-модульного.

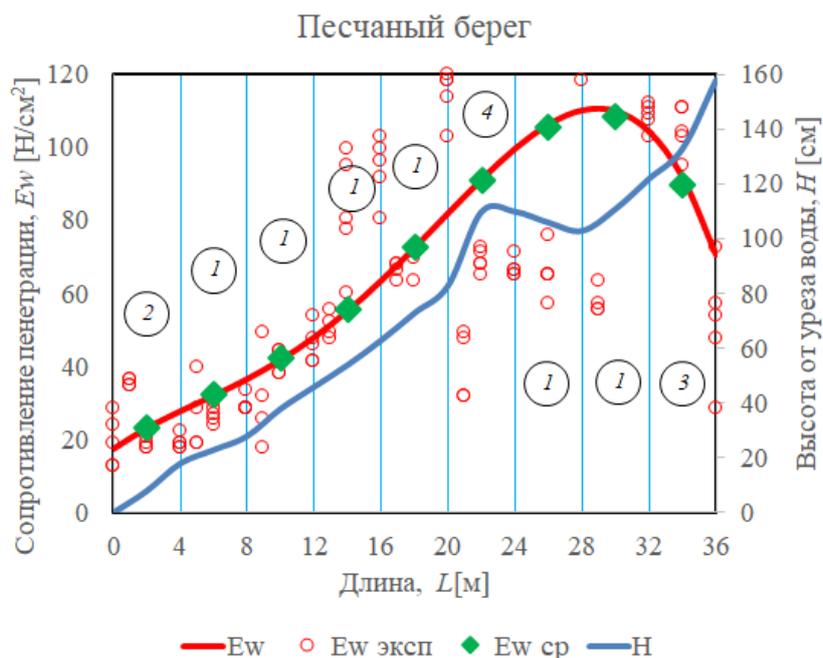


Рис. 9. Изменение сопротивления пенетрации и высоты от уреза воды по протяженности для песчаного берега. Средние значения

Fig. 9. Change in penetration resistance and height from the water's edge along the length for a sandy shore. Average values

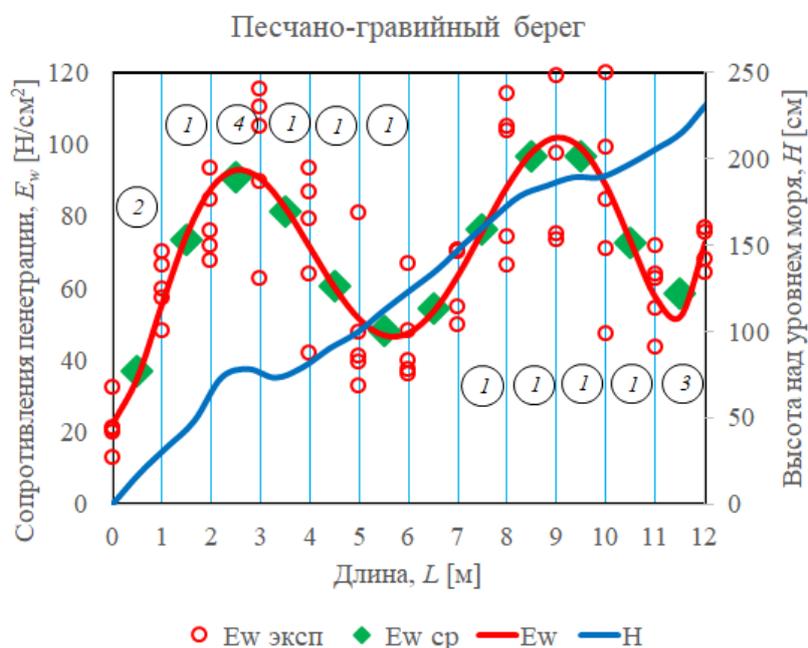


Рис. 10. Изменение сопротивления пенетрации и высоты от уреза воды по протяженности для песчано-гравийного берега. Средние значения

Fig. 10. Change in penetration resistance and height from the water's edge along the length for a sand-gravel shore. Average values

На следующем этапе исследования были получены характеристики опорных поверхностей в береговой зоне с учетом траектории движения МАК, средние значения изменения сопротивления пенетрации и высоты берега в зависимости от удаления от уреза воды по протяженно-

сти. Зная сопротивление пентрации (E_w , Н/см²), можно получить прочие параметры, необходимые для расчета физико-механических параметров грунта (модуль упругости (E_y , Н/см²), угол внутреннего трения ($\varphi_{гр}$, °), удельное сцепление грунта ($C_{гр}$, МПа)) [1, 2]. На рис. 9 и 10 цифрами показаны: 1 – участки с «хорошими» опорно-тяговыми свойствами, по которым МАК движется большую часть времени, 2 – участок близ уреза воды, 3 – участок близ уступа, 4 – участок близ уступа от наката волн.

Таким образом, в отличие от работ [1, 2], оценку эффективности движения МАК можно производить с учетом вероятности их возникновения на пути движения, а не с учетом распределенности на всем участке берега. Дополнительно были проанализированы существующие критерии эффективности движения МАК в береговой зоне. Исследованием эффективности движения в разное время занимались А.А. Аникин, В.Ф. Бабков, В.В. Беляков, Л.В. Барахтанов, Г.Б. Безбородова, М.Г. Беккер, Я.И. Бронштейн, В. Диксон, В.И. Гребенщиков, Д.В. Зезюлин, В.Ф. Платонов, Ю. Мацкерле, Дж. Вонг, В.В. Ларин, А.А. Токарев, В.И. Панов, Л.Г. Трёмбовельский, В.А. Горелов, В.И. Котляренко, В.С. Макаров и многие другие ученые и исследователи из научных школ НАМИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. П.Е. Алексеева и др.

На основании анализа данных работ предложено три критерия оценки подвижности и эффективности МАК в береговой зоне.

1. Первый критерий позволит оценить запас тяги с учетом удаленности шасси от уреза воды. Записать данный критерий можно в следующем виде (динамический фактор в зависимости от удаления от уреза воды) (1):

$$D = D(L), \quad (1)$$

где L – расстояние от уреза воды.

2. Второй критерий характеризует вероятность, с которой на всем протяжении пути можно использовать шасси МАК при движении вдоль берега с учетом реальных данных о траектории движения МАК (2):

$$K_3 = \sum_{i=1}^n p_i, \text{ если } D_i > 0, \text{ то } p_i = p_i, \text{ если } D_i \leq 0, \text{ то } p_i = 0, \quad (2)$$

где i – номер участка от уреза воды с условно одинаковыми характеристиками, p_i – вероятность движения по заданному участку с учетом режима (прямо или поворот).

3. Третий критерий учитывает запас тяги и вероятность возникновения данной величины на всем протяжении движения (3):

$$K_{3\%} = \sum_{i=1}^n p_i D_i, \text{ если } D_i > 0, \text{ то } p_i = p_i, \text{ если } D_i \leq 0, \text{ то } p_i = 0 \quad (3)$$

На основании проведенных экспериментов, приведенных математических моделей и критериев разработана методика оценки подвижности и эффективности МАК в береговой зоне с учетом особенностей траектории движения. Структура методики приведена на рис. 11.

Из экспериментальных данных было получено, что кривизна графиков для снега и песка имеет разную выпуклость, что соответствует существующей теории касательно математических моделей, описывающих процесс «нагрузка-осадка». Для снега будет справедлива зависимость В.А. Малыгина (4):

$$h = q[h_{\max}^{-1} q + \gamma]^{-1}, \quad (4)$$

где h – осадка (глубина погружения), q – нагрузка на штамп, γ – коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости в начальной стадии деформации; $h_{\max} = h_{\max}(H)$ – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению, зависит от H – высоты снежного покрова.

Для определения зависимости грунта сжатию можно применять зависимость Горякина-Летошнева (5):

$$q = c h^n, \quad (5)$$

где c и n – константы грунта.

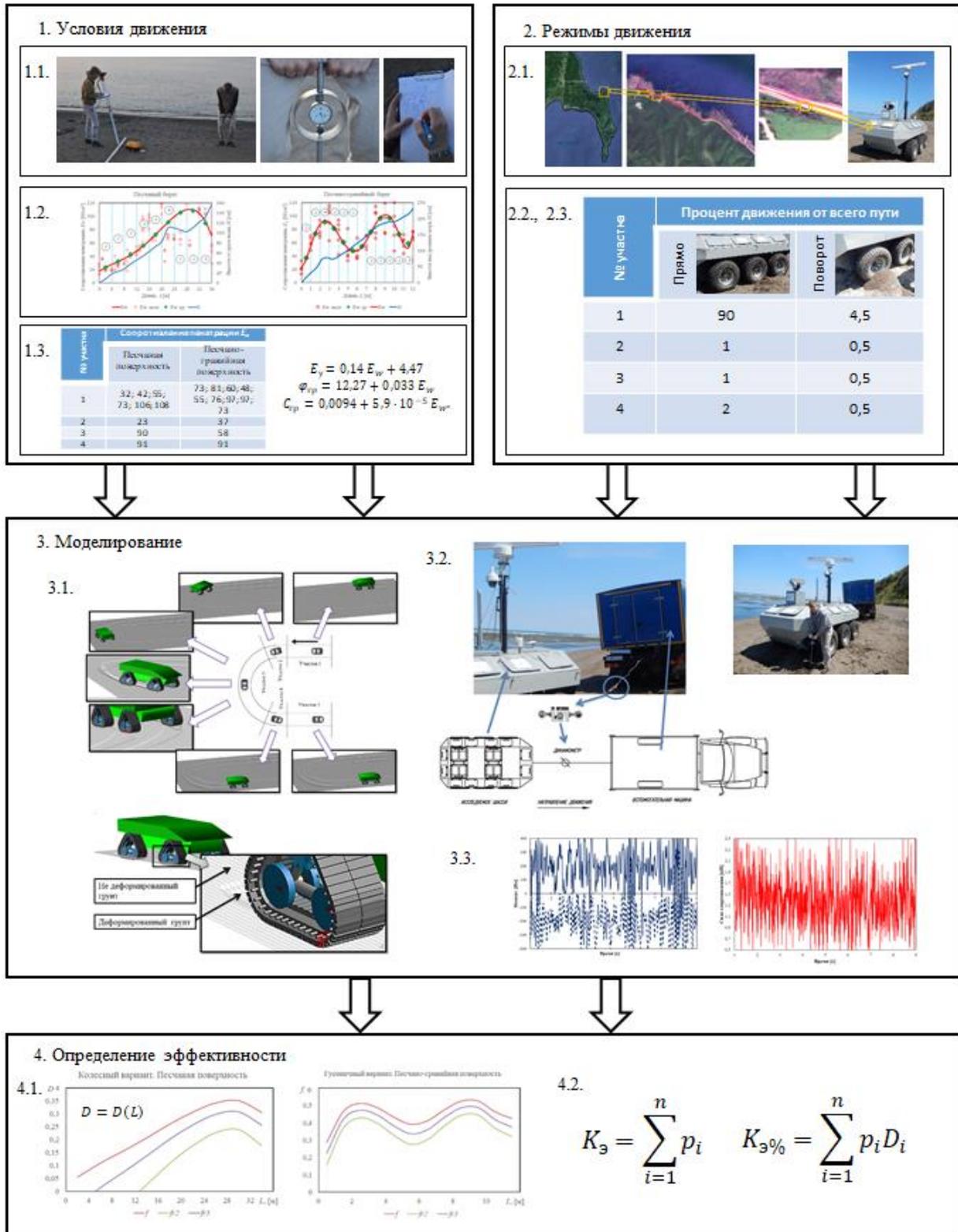


Рис. 11. Методика оценки подвижности и эффективности МАК в береговой зоне с учетом особенностей траектории движения

Fig. 11. Methodology for assessing the mobility and efficiency of the MAC in the coastal zone, taking into account the peculiarities of the trajectory of movement

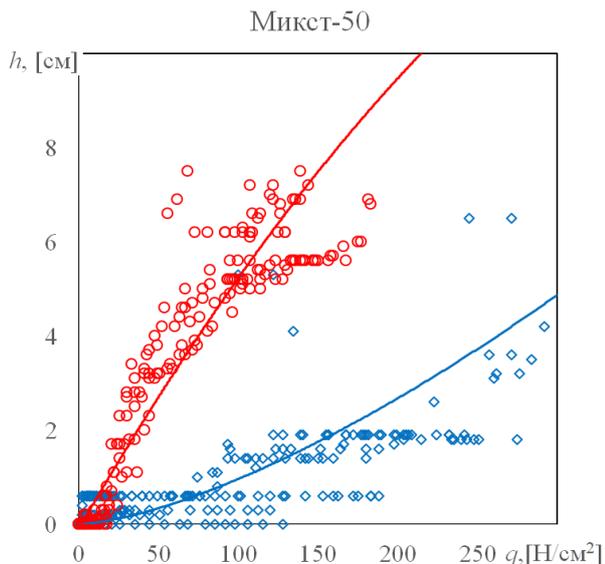


Рис. 12. Экспериментальные данные и аналитическая зависимость

Fig. 12. Experimental data and analytical dependence

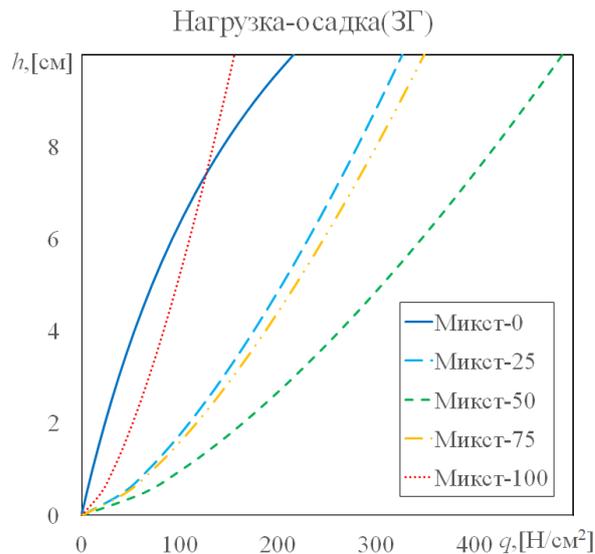


Рис. 13. Графики для нетронутой опорной поверхности

Fig. 13. Graphs for an intact reference surface

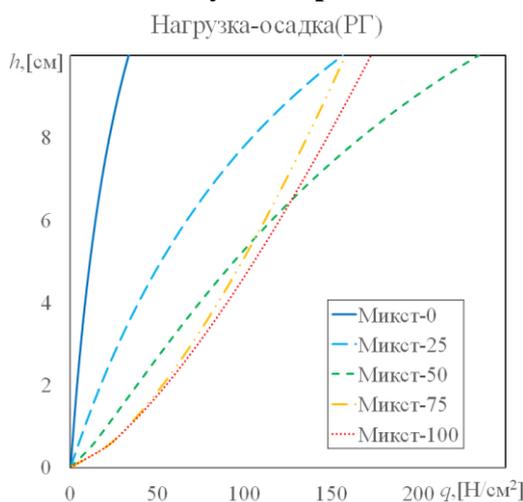


Рис. 14. Графики для опорной поверхности подвергнутой деформации при температурах около -5°C

Fig. 14. Graphs for the support surface subjected to deformation at temperatures of about -5°C

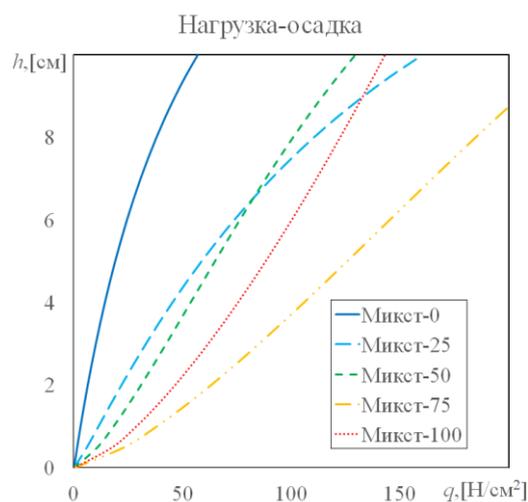


Рис. 15. Графики для опорной поверхности и подвергнутой деформации при температурах $(-25^{\circ}\text{C}) - (-20^{\circ}\text{C})$

Fig. 15. Graphs for the support surface subjected to deformation at temperatures of about $(-25^{\circ}\text{C}) - (-20^{\circ}\text{C})$

Наиболее общим случаем, объединяющим зависимости (4) и (5), является зависимость, предложенная С.Е. Маняниным (6):

$$q = c_1(H) h^{n_1(H)} \quad (6)$$

где $c_1(H) = k_1 e^{-k_2 h_{\max}(H)} + \gamma$, $n_1(H) = a_1 H + b_1$, $a_1 = -a_{11} \rho + b_{11}$, a_{11} , b_{11} , b_1 , k_1 , k_2 – эмпирические коэффициенты, ρ – плотность снега.

В общем случае зависимость для определения «нагрузки-осадка» для микста можно представить в виде [17, 18] (7):

$$q = K_{cr} q_c(h) + K_{cr} q_r(h), \quad (7)$$

где $q_c(h)$ и $q_r(h)$ – зависимости (2) и (3), $K_{сг}$, $K_{гс}$ – коэффициенты, учитывающие влияние снежного и грунтового компонентов, они зависят от концентрации каждого из компонентов $K_{сг} = K_{сг}(C_c)$, $K_{гс} = K_{гс}(C_r)$, $C_c + C_r = 1$. Примеры полученных графиков приведены на рис. 10-13.

На рис. 12 синими ромбиками показаны экспериментальные данные для нетронутой опорной поверхности, красными кружочками – для опорной поверхности подвергнутой деформации.

Для описания сдвиговых характеристик микстов предложена следующая эмпирическая зависимость [19] (8):

$$\varphi_x = \sum_{i=0}^3 a_i C_r^i, \tag{8}$$

где a_i – эмпирические коэффициенты, C_r – параметр, характеризующий процентное содержание грунта в смеси. Для графика на рисунке 16 $\varphi_x = 0,24 C_r^3 - 0,16 C_r^2 + 0,08 C_r + 0,22$.

Для анализа влияния параметров шасси были использованы следующие зависимости для расчета силы сопротивления движению для МАК с колесным и гусенично-модульным движителем.

Сила сопротивления от смятия микста (9):

$$F_f = B \left\{ K_{сг} c_1 \left[\frac{h_M^{n_1+1}}{n_1+1} \right] + K_{гс} c \left[\frac{h_M^{n_1+1}}{n_1+1} \right] \right\}, \tag{9}$$

где h_M – глубина погружения движителя в микст.

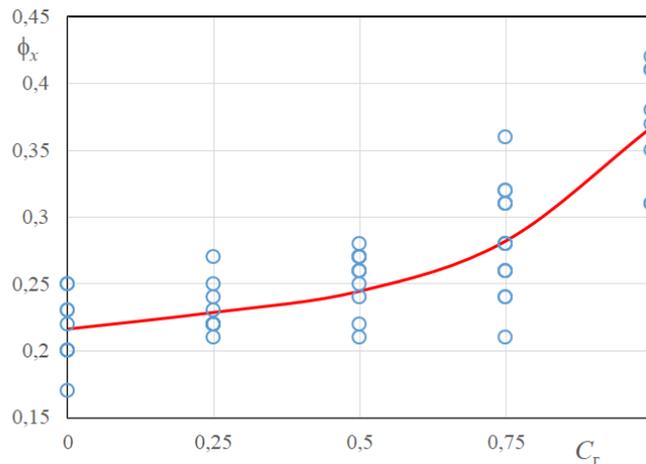


Рис. 16. Экспериментальные и теоретические значения коэффициента сцепления для микстов

Fig. 16. Experimental and theoretical values of the coupling coefficient for mixes

Для определения h_M – можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$R_z = B \xi \left[L q(h_M) + B \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi q(h_M - R(1 - \cos \varphi)) d\varphi \right], \tag{10}$$

при $\varphi_1 = \arccos((R - h_{ш})/R)$, $\varphi_2 = \arccos((R - h_M - h_{ш})/R)$. В зависимости (10) R_z – нагрузка на движитель, B – ширина колеса или гусеницы, L – расстояние между соседними катками для гусенично-модульного движителя или длина линии контакта шины в плоской части, $h_{ш}$ – деформация шины, для гусеницы $h_{ш} = 0$, ξ – коэффициент учета неравномерности давления.

Для наглядности параметры, входящие в зависимость (10), укажем на рис. 17.

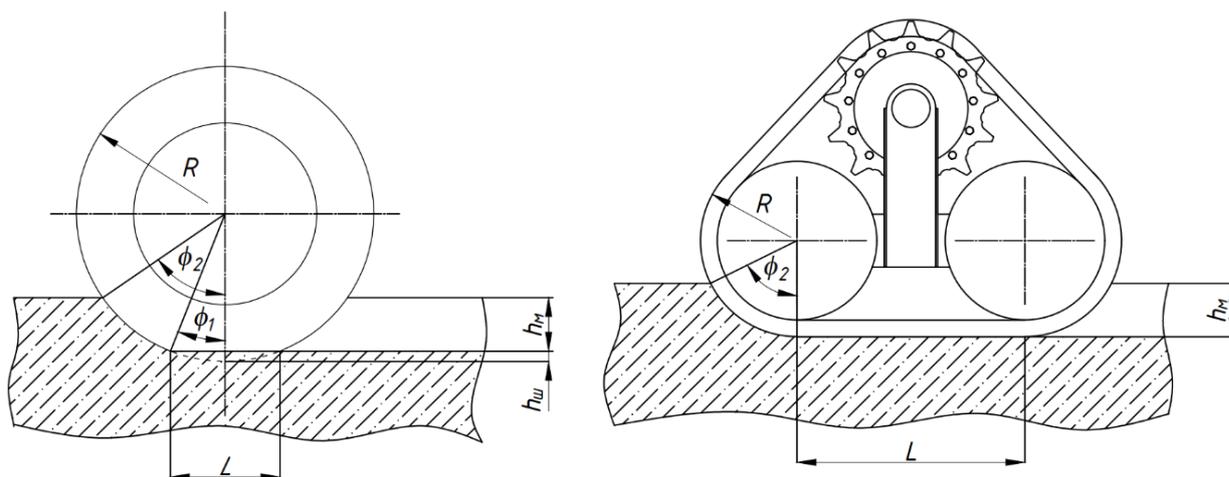


Рис. 17. Схемы к расчету формулы (10)

Fig. 17. Schemes for calculating the formula (10)

Сила сопротивления от экскавационного эффекта (11):

$$F_3 = F_\tau S_6, \quad (11)$$

где F_τ – сила трения движителя с полотном пути, S_6 – буксование.

Данные модели были использованы для оценки параметров шасси на сопротивление движению. При движении по опорным поверхностям типа микст.

Теоретические исследования

С использованием методики, представленной на рис. 11, проведен расчет параметров подвижности и эффективности МАК в береговой зоне с учетом особенностей траектории движения по зависимостям (1)-(3).

Примеры запаса тяги в зависимости от удаления от уреза воды показан на рис. 18. На графиках обозначены «f» – прямолинейное движение, «f2» и «f5» – движение с радиусами поворота 2 и 5 м. Также были рассчитаны коэффициенты эффективности:

- для песчаного пляжа для колесного шасси $K_3 = 99\%$, $K_{3\%} = 0,23$, для гусенично-модульного $K_3 = 100\%$, $K_{3\%} = 0,44$;
- для песчано-гравийного для колесного шасси $K_3 = 100\%$, $K_{3\%} = 0,29$, для гусенично-модульного $K_3 = 100\%$, $K_{3\%} = 0,47$.

Далее было проанализировано, как влияют параметры шасси на сопротивление МАК при движении по микстам. Были получены графики сил сопротивления для шасси с колесным и гусенично-модульным движителем в зависимости от полной массы шасси и размеров движителя. На рис. 19-21: 1 (ЗГ) – микст при температуре около 5°C в неразрушенном состоянии, 2 (РГ) – микст при температуре около -5°C при повторном нагружении, 3 (РГ) – микст при температуре около $(-20) - (-25)^\circ\text{C}$ при повторном нагружении. Даны рекомендации касательно исследуемых параметров.

Аналогичные данные были получены для колесного и гусенично-модульного вариантов шасси для рассматриваемых типов микстов. В результате анализа даны рекомендации к конструкции шасси МАК.

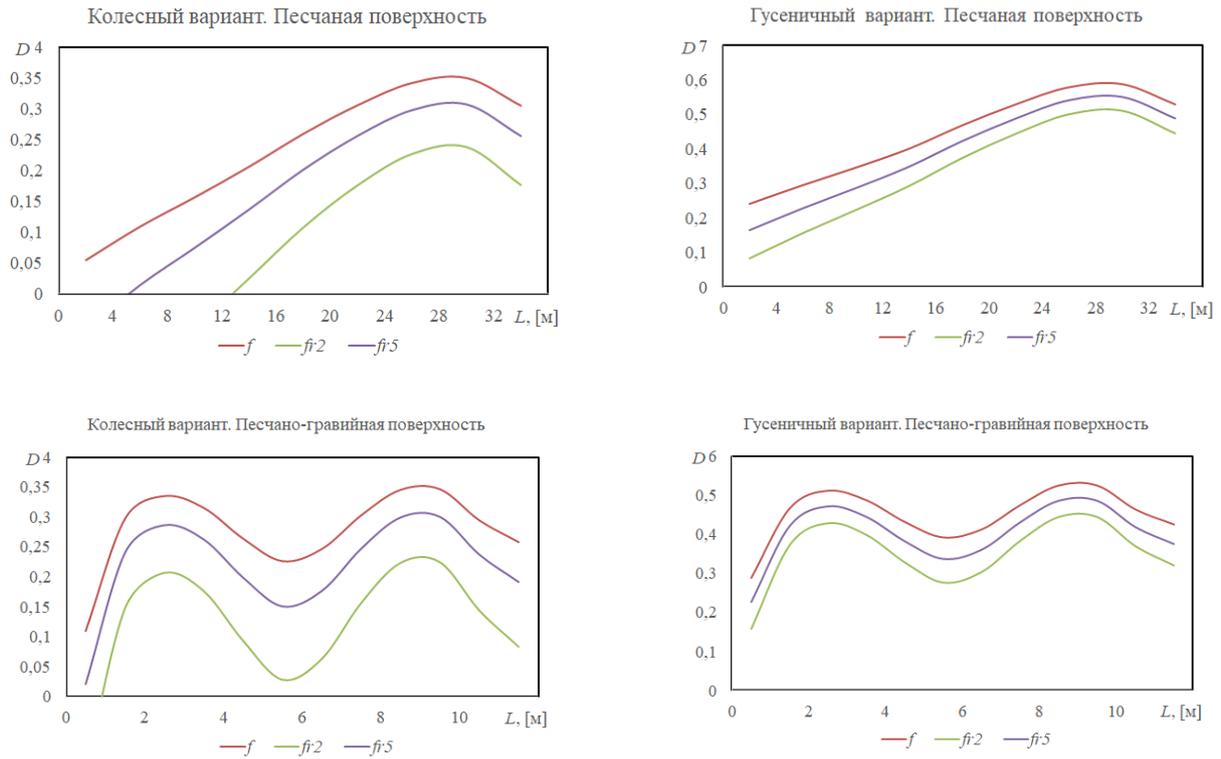


Рис. 18. Запас тяги в зависимости от удаления от уреза воды

Fig. 18. Thrust reserve depending on the distance from the water edge

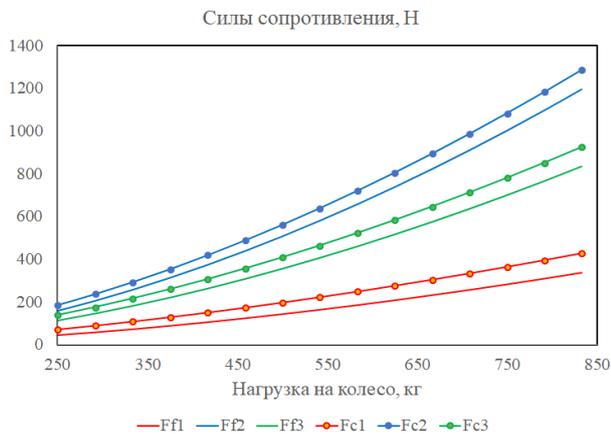


Рис. 19. Зависимость силы сопротивления от смятия и суммарной силы, учитывающей экскавационную составляющую для колеса МАК при разных полных массах для микста-0

Fig. 19. The dependence of the resistance force on the crumpling and the total force taking into account the excavating component for the MAC wheel at different total masses for the mix is 0

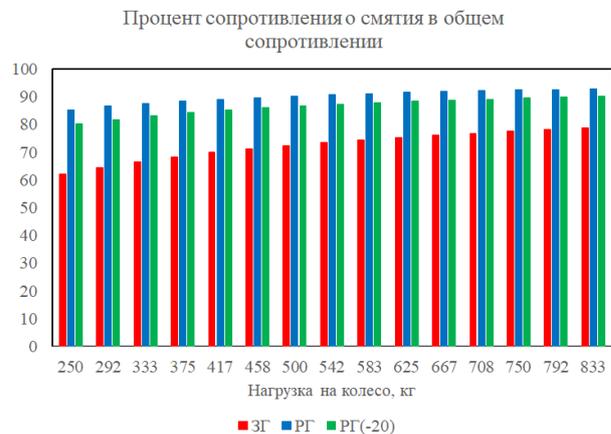


Рис. 20. Процент силы сопротивления от смятия в суммарной силе сопротивления для колеса МАК при разных полных массах для микста-0

Fig. 20. The percentage of the resistance force from crumpling in the total resistance force for the MAC wheel at different total weights for the mix is 0

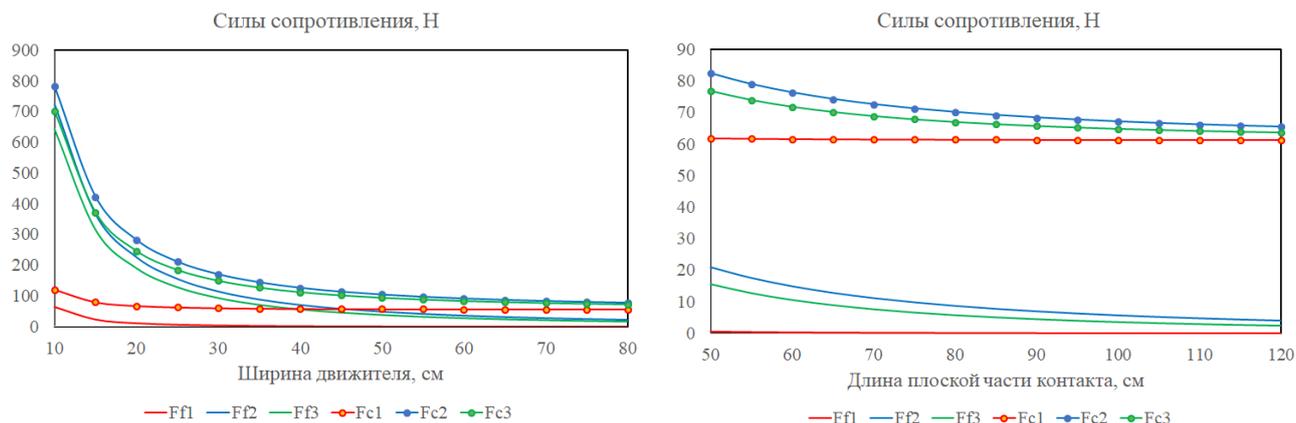


Рис. 21. Зависимость силы сопротивления от смятия и суммарной силы, учитывающей экскавационную составляющую для движителя МАК при разных полных ширинах гусеницы (слева) для микста-25 и разных длинах плоской части гусеничного модуля (справа) для микста-50

Fig. 21. The dependence of the drag force on the crumpling and the total force taking into account the excavator component for the MAC propeller at different full track widths (left) for the mix-25 and different lengths of the flat part of the crawler module (right) for the mix-50

Выводы

1. Разработана методика расчета подвижности и эффективности МАК при движении по песчано-гравийным берегам с учетом изменчивости характеристик опорных оснований на пути движения шасси, а также режимов движения. Методика содержит следующие основные части: условия движения, режимы движения, моделирование и определение подвижности и эффективности движения шасси в береговой зоне с учетом процентного распределения характеристик на типовых участках, продолжительности и траектории движения на них.

2. Проведены экспериментальные исследования по измерению физико-механических характеристик песчаных и песчано-гравийных береговых зон с учетом изменчивости их параметров в зависимости от удаления от уреза воды. По песчаным пляжам получены уточненные данные в отличие от более ранних исследований других авторов.

3. Проведены экспериментальные исследования траектории движения МАК в береговой зоне. Получено процентное распределение прямолинейного и криволинейного движения с разными радиусами в зависимости от характера участков по которым едет шасси МАК. Установлено, что около 90 % траектории движения МАК составляет прямолинейное движение по середине участка берега с хорошими тягово-сцепными свойствами. Оставшаяся часть (около 3 %) – это повороты с радиусами, близкими к 5 м, и 1,5 % – к 2 м. Приблизительно по 1 % – движение вдоль уреза воды и дальней части берега и приблизительно по 0,5 % – на осуществление разворотов с радиусами, близкими к 5 м, для обоих случаев. На участках берега с характерным уступом от наката волн пробег около 2 % и повороты с радиусами, близкими к 5 м – 0,5 %.

4. Предложены критерии оценки подвижности и эффективности движения МАК в береговой зоне. Первый критерий позволит оценить запас тяги представленный в безразмерном виде (динамический фактор) в зависимости от удаления от уреза воды. Второй критерий характеризует, с какой вероятностью на всем протяжении пути можно использовать шасси МАК при движении вдоль берега с учетом реальных данных о траектории движения МАК. Он представляет собой произведение динамического фактора и вероятности возникновения данной величины на всем протяжении движения.

5. Предложен подход к моделированию движения МАК с целью определения необходимых параметров движения шасси в береговой зоне, а именно: движение по «С»-образной траектории с выделением пяти характерных участков: участок 1 – трогание и разгон до заданной скорости; участок 2 – вхождение в поворот; участок 3 – установившееся криволинейное движение с заданным радиусом; участок 4 – выход из поворота; участок 5 – прямолинейное установившееся движение. Описано моделирование шасси МАК в программе MSC.ADAMS Tracked Vehicle.

6. Проведены сравнения теоретической модели и экспериментальных данных, полученных в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016-20017 гг. Экспериментальные значения сил сопротивления, полученные на реальном объекте, были использованы для отладки цифровой модели МАК. В результате отклонения при моделировании и эксперименте составили следующие значения: для шасси с колесным движителем 4,3 % на песчаном пляже и 8 % на песчано-гравийном, для гусенично-модульном движителе 0,4 % и 1,5 % соответственно.

7. Проведены расчеты критериев подвижности и эффективности. Получены зависимости запаса тяги в зависимости от расстояния до уреза воды. Получены значения критерия, оценивающего, на каком участке (в процентах) можно использовать шасси МАК при движении вдоль берега, для песчаного пляжа для колесного шасси $K_3 = 99\%$, для гусенично-модульного $K_3 = 100\%$; для песчано-гравийного $K_3 = 100\%$ для двух вариантов шасси. Критерий, учитывающий запас тяги и вероятность возникновения данной величины на всем протяжении движения, для песчаного пляжа и колесного шасси $K_{3\%} = 0,23$, для гусенично-модульного $K_3 = 0,44$; для песчано-гравийного пляжа и колесного шасси $K_{3\%} = 0,29$, для гусенично-модульного $K_3 = 0,47$.

8. Впервые проведены экспериментальные исследования деформационных и сдвиговых свойств минерально-снежных микстов. Разработана новая методика, заключающаяся в подготовке микстов путем смешивания известных объемов песка и снега. Смешивание проводится при низких температурах, исключающих таяние снега. При эксперименте температура составляла порядка $-20-25\text{ }^\circ\text{C}$. Введено понятие обозначающее состав микстов, а именно: процентное содержание минеральной фазы в общем объеме. Получены «Микст-100» (песок), «Микст-75», «Микст-50», «Микст-25», «Микст-0» (снег).

9. Приведены зависимости для расчета характеристики «нагрузка-осадка» для микстов. В общем виде деформация снега подчиняется зависимости Малыгина и имеет одну вогнутость, деформация песка подчиняется зависимости Летошнева-Горячкина и имеет обратную вогнутость. Миксты в зависимости от процентного состава постепенно меняются свою вогнутость. При этом переход от одного вида кривизны к другому зависит как от процентного состава смеси, так и от температуры, а также от того, находится микст в неразрушенном состоянии или при повторном нагружении. Приведены значения коэффициентов, входящих в формулы. Также были получены зависимости для упрощенного расчета для моделирования в пакетах программ для математического моделирования.

10. Впервые приведены зависимости для расчета сдвиговых характеристик микстов в зависимости от процентного соотношения минеральной составляющей. Получена эмпирическая зависимость изменения коэффициента сцепления в зависимости от состава снежно-песчаной смеси.

11. Проведены расчеты по определению влияния параметров шасси МАК полной массой 2 т в колесном (6х6) и гусенично-модульном (4х4) вариантах на сопротивление движению при движении по микстам, получены следующие данные:

11.1. Влияние массы шасси.

11.1.1. При росте полной массы шасси в 2,5 раза рост сопротивления движения составляет 3-4,4 раза в зависимости от типа микста. При этом в зависимости от типа микста разница в сопротивлении движению составляет до 5,2 раз между микстом-0 и микстом-100, большие значения справедливы для снега (микст-0), так как он имеет меньшую несущую

способность. При этом при буксовании 5 % сопротивление от смятия микста составляет от 10 до 43% от общего сопротивления для микста-100 и от 62 до 93 % для микста-0, меньшие значения советуют меньшей массе шасси.

В значительной степени на сопротивление движению влияют состав, структура микста и температура. Для микстов в неразрушенном и разрушенном состоянии прирост сопротивления составляет порядка 3-4 раза для второго случая для микстов-0-50 и до 1,4 для микста-75, для микста-100 наблюдаются близкие значения. При этом при температуре около -5°C и -20°C также значения сопротивления различны. Для микста-0 сопротивление на 40 % меньше во втором случае, для остальных микстов значения отклоняются в пределах 10 % в большую или меньшую сторону.

11.1.2. При росте полной массы шасси в 2,5 раза рост сопротивления движения составляет 2,5-3,8 раза в зависимости от типа микста. При этом, в зависимости от типа микста, разница в сопротивлении движению составляет до 2,9 раз между микстом-0 и микстом-100, большие значения справедливы для снега (микст-0), так как он имеет меньшую несущую способность. При этом при буксовании 5 % сопротивление от смятия микста составляет от 2 до 9 % от общего сопротивления для микста-100 и от 28 до 75 % для микста-0, меньшие значения советуют меньшей массе шасси.

В значительной степени на сопротивление движению влияет состав, структура микста и температура. Так, для микстов в неразрушенном и разрушенном состоянии прирост сопротивления составляет порядка 2,6-3,8; большие значения соответствуют миксту-0. При этом при температуре около -5°C и -20°C также значения сопротивления различны. Прирост сопротивления составляет от 0 до 100 % в зависимости от типа микста; миксту-0 соответствуют большие значения.

11.2. При ширине колеса или гусеницы менее 25-30 см наблюдается интенсивный рост сопротивления при всех типах микстов. Поэтому делать шасси с колесами или гусеницами меньшего размера не целесообразно. Дальнейшее увеличение ширины практически линейно снижает сопротивление движению при прочих равных условиях. При этом разница в сопротивлениях движению для разных типов микстов составляет до 3,8 раз между микстом-0 и микстом-100.

В значительной степени на сопротивление движению влияет состав, структура микста и температура. Так для микстов в неразрушенном и разрушенном состоянии прирост сопротивления составляет до 2,8 раз для, для микста-100 наблюдаются значения близкие к 1. При этом при температуре около -5°C и -20°C также значения сопротивления различны. Для второго случая сопротивления меньше до 30 % для микста-0, для микста-100 наблюдаются значения близкие к 0 %.

11.3. Влияние длины контакта.

11.3.1. Средний размер плоской части опорной поверхности колеса должен составлять не менее 15 см, наблюдается интенсивный рост сопротивления для всех типах микстов. При этом разница в сопротивлениях движению для разных типов микстов составляет до 6,8 раз между микстом-0 и микстом-100. При этом при буксовании 5 % сопротивление от смятия микста составляет от 5 до 44 % от общего сопротивления для микста-100 и от 50 до 95 % для микста-0, меньшие значения советуют большей длине контакта.

В значительной степени на сопротивление движению влияет состав, структура микста и температура. Так, для микстов в неразрушенном и разрушенном состоянии прирост сопротивления составляет порядка 3,1-5,2 раз для второго случая для микстов-0-50 и до 1,4 для микста-75, для микста-100 наблюдаются близкие значения. При этом при температуре около -5°C и -20°C также значения сопротивления различны. В зависимости от типа микста для второго случая сопротивление изменяется от 0,7 до 1,1 раз от микста-0 до микста-100.

11.3.2. Чем больше средний размер плоской части опорной поверхности гусеничного модуля, тем меньше сопротивление движению. Разница в сопротивлении движению для микста-0 и микста-100 составляет до двух раз. При этом при буксовании 5 % сопротивление

от смятия микста составляет от до 5 % от общего сопротивления для микста-100 и от 14 до 72 % для микста-0, при длине контакта от 120 до 50 см.

В значительной степени на сопротивление движению влияет состав, структура микста и температура. Так, для микстов в неразрушенном и разрушенном состоянии прирост сопротивления составляет до двух раз, для микста-100 наблюдаются значения, близкие к 1. При этом при температуре около $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения сопротивления также различны. Для второго случая для микста-0 сопротивление снижается до 22 %, для микста-100 наблюдаются значения, близкие к 0.

12. Теоретические разработки, методики расчетов, результаты экспериментальных исследований, практические рекомендации внедрены на ООО «ТрансМаш», ООО «Завод Вездеходных Машин», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований» ДВО РАН (СКБ САМИ), а также используются в учебном процессе кафедры «Автомобили и тракторы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Работа проведена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – докторов наук МД-226.2020.8.

Библиографический список

1. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон / Диссертация ... докт. техн. наук: 05.05.03 М: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2017.
2. **Беляков, В.В.** Подвижные комплексы мониторинга прибрежной зоны / В.В. Беляков [и др.] – Нижний Новгород, 2017. – 326 с.
3. Отраслевая научно-исследовательская лаборатория вездеходных (снегоходных) машин: к 50-летию со дня основания (1962-2012 гг.) / под ред. В.В. Белякова; Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. – 271 с.
4. **Beliakov, V.** Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot/ V.V. Beliakov [et al.] // Science of Tsunami Hazards. 2017. Vol. 36-1, P.1-12.
5. **Kurkin, A.** Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin [et al.] // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). 2015. Vols 1 and 2. P. 933-943.
6. **Zaytsev, A.** Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot / A. Zaytsev [et al.] // Science of Tsunami Hazards. 2015. Vol. 36. Issue 1. 2017. P. 1-12.
7. **Kurkin, A.** Study of coastal soil surfaces of sakhalin island / A. Kurkin [et al.] // Paper presented at the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. 2017. Vol. 2. P.775-785
8. **Kurkin, A.** Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring / A. Kurkin [et al.] // International Journal of Imaging and Robotics, 2017. Vol. 17-1. P. 64-75
9. **Kurkin, A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A. Kurkin [et al.] // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. P. 459-465
10. **Belyaev, A.M.** Analysis of the main bases of the coastal zone, as a pathway for the movement of special vehicle and monitoring complexes/ A.M. Belyaev et al./ IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 386 (2018) 012002
11. **Belyaev, A.M.** Method of assessment of special wheel chassis mobility in cases of sand-gravel bases crossing / A M Belyaev, V S Makarov/ IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 194 (2018) 022019
12. **Belyaev, A.M.** Field research of drag-and-traction characteristics of mobile robotic system in coastal zone / A.M. Belyaev et al./ IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012050.
13. **Belyaev, A.M.** Study of efficiency of a 6x6 all-terrain vehicle in coastal zone / A.M. Belyaev, V.V. Belyakov, V.S. Makarov/ IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044030.
14. **Belyaev, A.M.** Modelling the motion of a mobile robotic complex in the coastal zone / A.M. Belyaev, V.V. Belyakov, V.S. Makarov/ IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1753 (2021) 012029
15. **Беляев, А.М.** Исследование движения шасси мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию / А.М. Беляев и др./ Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2020. №2(129). С. 94-106.

16. **Belyaev, A.** Experimental Theoretical Study of the Mobile Robotic System Movement with Caterpillar-modular Propulsion on the Beach Line Terrain / A.M. Belyaev et al./ Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2020). P. 567-572.
17. **Belyaev, A.** Study of Deformation Properties of Road Foundations of the Mixed Type Intended for the Movement of Mobile Complexes for Monitoring and Transporting Raw Materials/ A.Belyaev et al./ E3S Web of Conferences, 2021.
18. **Belyaev, A.** Experimental and theoretical study of deformation properties of snow-and-sand mixed surfaces exposed to motion of all-terrain vehicles / A. Belyaev et al.// 20th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2021
19. **Belyaev, A.** A study of physical and mechanical properties of soil-and-snow mixtures / A.Belyaev et al./ AIP Conference Proceedings, 2021.

Дата поступления

в редакцию: 31.08.2021