

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629. 336

А.М. Беляев<sup>1</sup>, А.А. Васильев<sup>1</sup>, Е.В. Жарков<sup>2</sup>, В.С. Макаров<sup>1</sup>, В.В. Беляков<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ШАССИ МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ГУСЕНИЧНО-МОДУЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ПО ПЕСЧАНОМУ ОПОРНОМУ ОСНОВАНИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
ООО «Объединенный инженерный центр»<sup>2</sup>

Рассматривается процесс имитационного моделирования движения шасси мобильного робототехнического комплекса (МРК) с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию. Показаны фрагменты построения цифрового двойника МРК в программном комплексе Adams Tracked Vehicle (ATV) с учетом массовых и геометрических параметров шасси, а также характеристик деформируемого грунта. Приведены 3D виды разработанной модели МРК. Дано описание проведенного цифрового эксперимента с указанием типовых элементов движения. Показаны графики изменения моментов сопротивления по бортам шасси и суммарных сопротивлений движения при прямолинейном и криволинейном движении по песчаному пляжу. Получены следующие средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении – 172 Н·м, при повороте с радиусом 5 м 195 и 217 Н·м соответственно для отстающего и забегающего бортов МРК; средние значения сопротивления движения при прямолинейном движении – 1606 Н, при повороте с радиусом 5 м 1943 Н. Исходными данными для характеристик опорного основания типа «песок» и данными для подтверждения результатов моделирования, а именно – значения сил сопротивления, были данные, полученные в НИЛ «Моделирование природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны.

*Ключевые слова:* подвижность, моделирование, гусеничный движитель, береговая зона, Adams, ATV, террамеханика, подвижность, цифровой двойник.

### Введение

Мониторинг береговых зон может проводиться с помощью стационарных постов либо специальных мобильных робототехнических комплексов (МРК) [1-9]. Для решения задачи обеспечения подвижности последних необходимо выбрать шасси с параметрами, наиболее подходящими к условиям эксплуатации, а также требованиям, накладываемым перечнем выполняемых работ. В рамках научной школы Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева понятие подвижности рассматривается как интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин, определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е., возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [10-12]. Данное понятие выступает интегральным по отношению ко всем предыдущим и является одним из определяющих в теории подвижности В.В. Белякова [10-12].

Для оценки подвижности в зависимости от требуемых задач можно использовать различные математические аппараты. Одним из них является имитационное моделирование с применением программ MSC.ADAMS. Вместе с тем, для подтверждения расчетов требуется проверка на реальном объекте, в качестве которого в настоящем исследовании выступает МРК для мониторинга прибрежной зоны, разработанный в НИЛ «Моделирование природ-

ных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [2, 7, 9, 13-15]. Отличительной особенностью данного МРК является возможность установки колесного, гусенично-модульного и роторно-винтового движителя. В данной статье рассмотрен вопрос моделирования движения шасси с гусенично-модульным движителем.

### Теоретические исследования

Для исследования МРК было использовано специализированное приложение для среды Adams, которое позволяет моделировать транспортные средства на гусеничном ходу. С помощью Adams Tracked Vehicle (ATV) проводится построение гусеничных машин, а также моделируется их движение с различными скоростями по твердому или деформируемому грунту.

*Допущения.* При создании цифрового двойника, моделирующего движение МРК с гусенично-модульным движителем по песчаному пляжу, были использованы следующие допущения:

- корпус, опорные катки, траки гусеничной цепи представлены в виде абсолютно жестких тел;
- гусеничная цепь состоит из траков, объединенных между собой силовым взаимодействием;
- корпус, траки и опорные катки взаимодействуют с опорным основанием;
- опорное основание описывается моделью Беккера;
- налипание грунта на корпус, траки и опорные катки отсутствует;
- траектория движения контролируется за счет PID-регулятора, в котором входным сигналом является расстояние между заданной траекторией движения и «контрольной точкой», привязанной к корпусу шасси, а выходным сигналом – крутящий момент на ведущих звездочках.

*Основные уравнения в модели движения.* Программный комплекс MSC.ADAMS, созданный для решения задач динамики твердого тела, использует систему дифференциальных уравнений. Моделирование гусеничных машин реализовано в данном комплексе за счет модуля MSC.ADAMS Tracked Vehicle(ATV). Модуль ATV включает в себя библиотеку элементов, встречающихся на гусеничной технике (балансиры, торсионы, опорные и поддерживающие катки, ленивец, трак, ведущие звезды и др.) Основной в данной программе является система уравнений, описывающая динамику системы твердых тел, находящихся под действием заданных сил и стесненных голономными связями – уравнения в форме Эйлера-Лагранжа с множителями.

Динамические уравнения Эйлера для поступательного движения (1):

$$\begin{aligned} m \, dV_x/dt &= \sum F_x \\ m \, dV_y/dt &= \sum F_y \\ m \, dV_z/dt &= \sum F_z \end{aligned} \quad (1)$$

Динамические уравнения Эйлера для вращательного движения (2):

$$\begin{aligned} I_x \, d\omega_x/dt + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z &= M_x \\ I_y \, d\omega_y/dt + (I_x - I_z)\omega_x\omega_z &= M_y \\ I_z \, d\omega_z/dt + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (2)$$

В зависимостях (1) и (2)  $m, I_i$  – масса и моменты инерции моделируемых тел относительно  $i$ -ой оси;  $dV_i/dt, d\omega_i/dt, \omega_i$  – линейные и угловые ускорения, угловая скорость относительно  $i$ -ой оси,  $F_i, M_i$  – силы и моменты в направлении  $i$ -ой оси.

### Создание цифрового двойника шасси МРК в ATV

МРК состоит из корпуса и четырех гусеничных модулей, включающих опорные катки, ведущую звезду и гусеничной цепи. Для формирования цифрового двойника МРК была использована конструкторская документация, разработанная на шасси. На рис. 1 показан чертеж общего вида шасси с гусенично-модульным движителем.

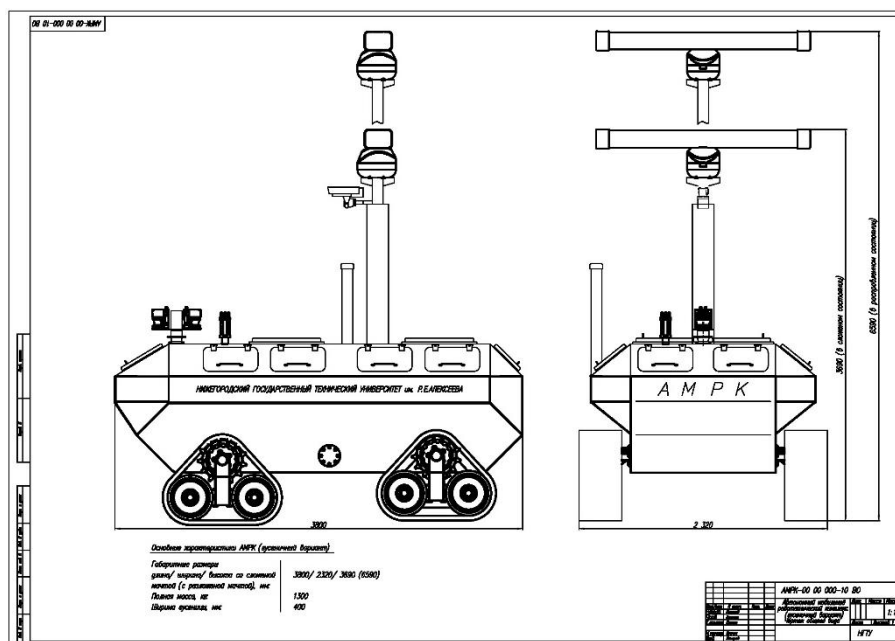


Рис. 1. Общий вид шасси МРК с гусенично-модульным движителем

В модели учитываются геометрические параметры и массо-инерционные характеристики корпуса, в том числе – положение центра тяжести. Ведущие звезды радиусом 215 мм приводят в движение гусеничный обвод по средствам зацепления с траками гусеницы. Зацепление ведущей звезды и траков происходит по средствам контактного взаимодействия с каждым из траков гусеничной цепи. На рис. 2 (слева) представлена визуализация ведущих звезд. Гусеничная цепь каждого модуля состоит из 29 траков с шагом 99 мм. На рис. 2 (справа) представлена визуализация трака.

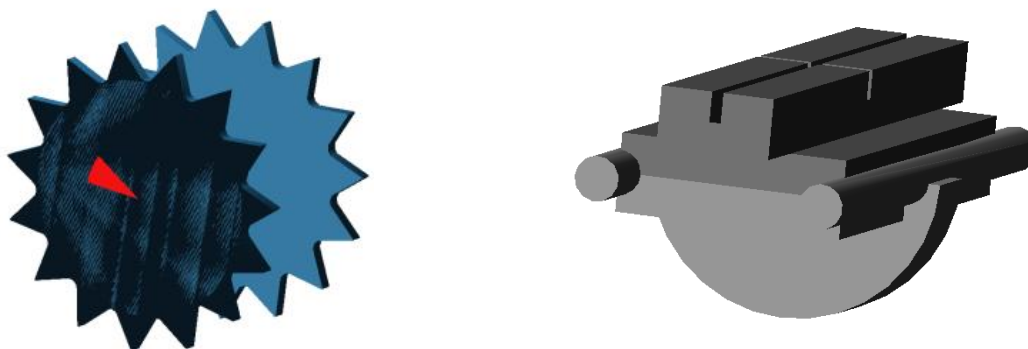


Рис. 2. Визуализация ведущей звезды и трака

В результате построения шасси МРК в среде ATV имеем следующий вид (рис. 3).

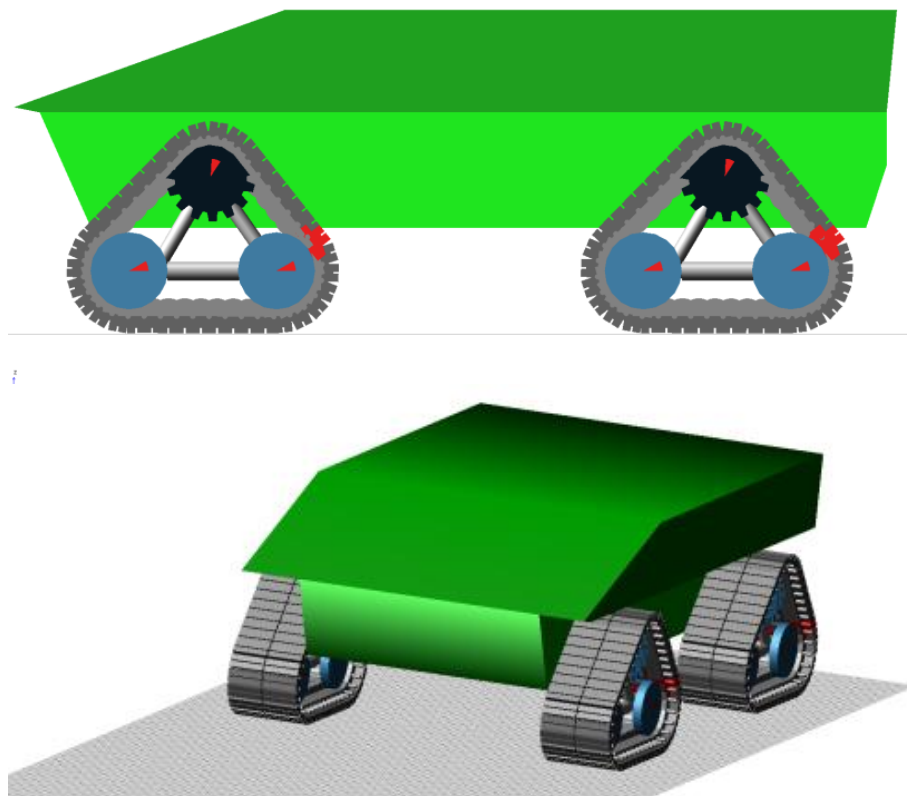


Рис 3. Модель МРК в ATV. Вид сбоку (сверху) и  $\frac{3}{4}$  (снизу)

### Создание деформируемого опорного основания в ATV

Модель деформируемого грунта имеет «память» и хранит в себе историю нагружения. В программном комплексе ATV модель деформируемого грунта визуализирована в виде прямоугольной сетки. Процесс создания деформируемого опорного основания в программном комплексе ATV сводится к выбору файла свойств грунта [16-20] с заданными характеристиками из базы данных.

Файл свойств деформируемого опорного основания представляет собой набор экспериментально полученных коэффициентов, описывающих тип грунта. В качестве исходных данных для моделирования были взяты данные с экспериментов, проведенных в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны. Основными исходными параметрами являются следующие: модуль упругости ( $E_y$ , Н/см<sup>2</sup>), угол внутреннего трения ( $\varphi_{гр}$ , °), удельное сцепление грунта ( $C_{гр}$ , МПа), плотность грунта ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>). При этом часть параметров связана между собой эмпирическими выражениями (3), и может быть вычислена через значение сопротивления пенетрации ( $E_w$ , Н/см<sup>2</sup>).

$$\begin{aligned} E_y &= 0,14 E_w + 4,47 \\ \varphi_{гр} &= 12,27 + 0,033 E_w \\ C_{гр} &= 0,0094 + 5,9 \cdot 10^{-5} E_w. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, на основании данных [21, 22] для моделирования были выбраны следующие значения:  $E_w = 60$  Н/см<sup>2</sup>,  $E_y = 12,87$  Н/см<sup>2</sup>,  $\varphi_{гр} = 14,25^\circ$ ,  $C_{гр} = 12,94$  кПа,  $\rho = 1,8$  г/см<sup>3</sup>.

В результате пересчетов и задания необходимых данных было создано песчаное опорное основание. МРК на деформируемом грунте (рис. 4).

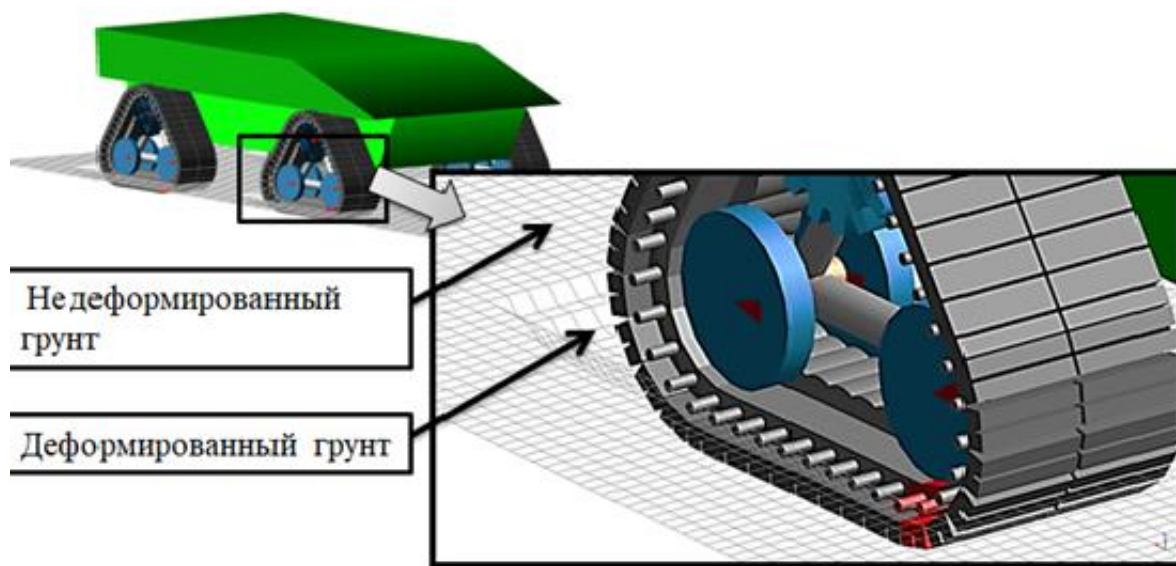


Рис. 4. МРК на деформируемом грунте

#### Моделирование движения МРК в ATV

Моделирование движения МРК было проведено по «С»-образной траектории с выделением следующих пяти характерных участков (рис. 5).

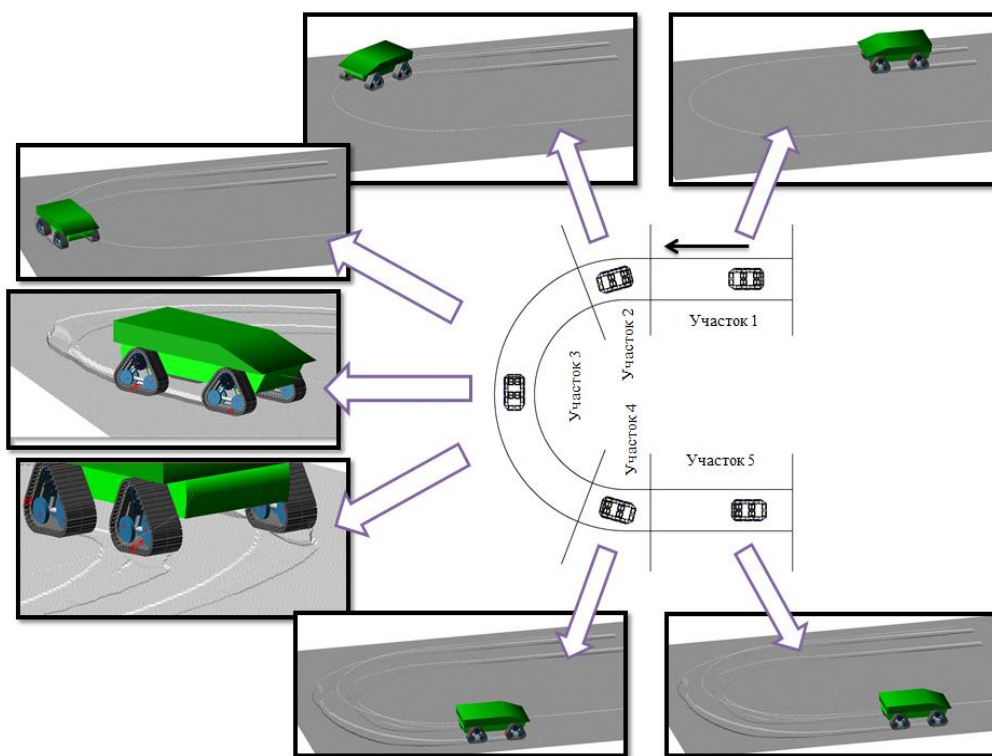


Рис. 5. Характерные участки моделирования криволинейного движения МРК по песчаному опорному основанию

На рис. 5 показаны следующие характерные участки:

- 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.

При моделировании движение МРК задавалось по опорному основанию с характеристиками, соответствующими математическому ожиданию параметров для песчаного пляжа береговых зон. МРК на участке 1 разгонялся до скорости 25 км/ч. Далее происходило вхождение в поворот (участок 2), с последующим равномерным криволинейным движением (участок 3) с радиусом поворота 5 м, выходом из поворота (участок 4) и равномерным прямолинейным движением (участок 5).

При моделировании фиксировались необходимые параметры, в том числе: моменты и мощности на ведущих звездах, буксование, положение, скорость и ускорение центра масс шасси, а также другие необходимые параметры. На рис. 6 показаны графики положения центра масс МРК в плане сверху, скорость на участке 1.

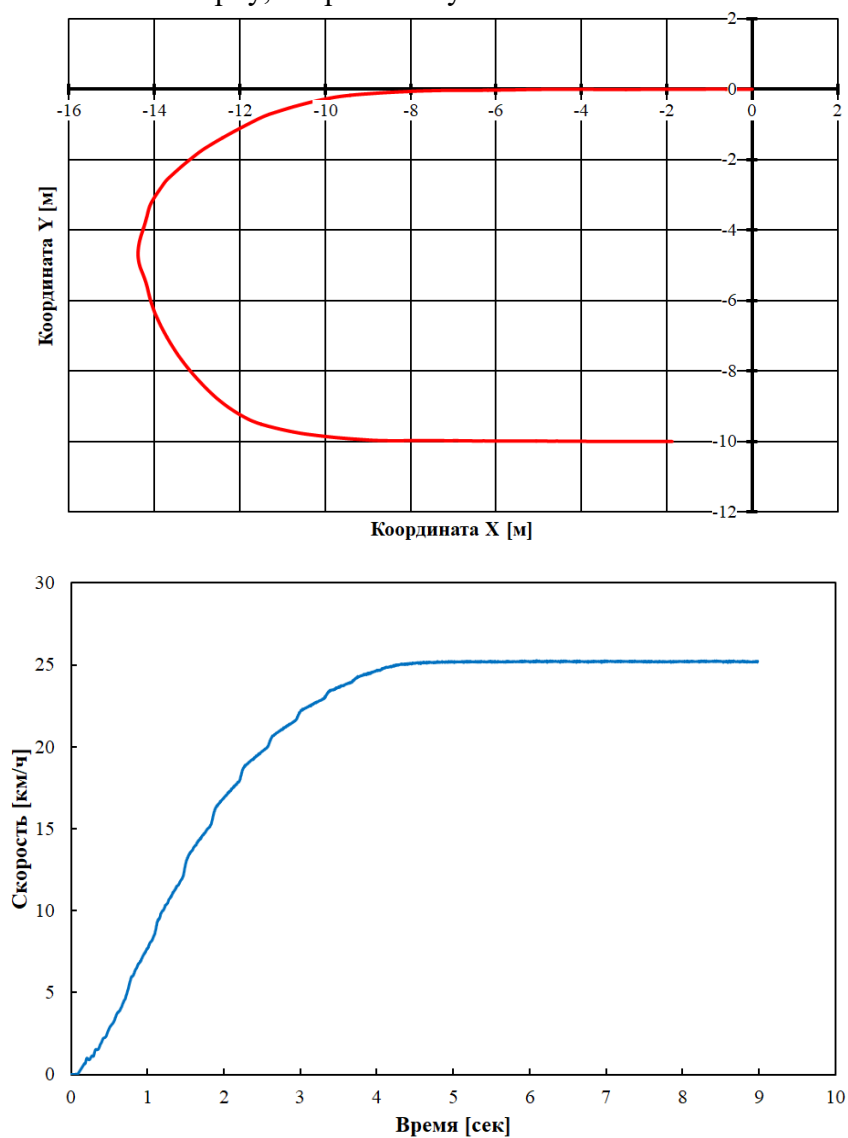
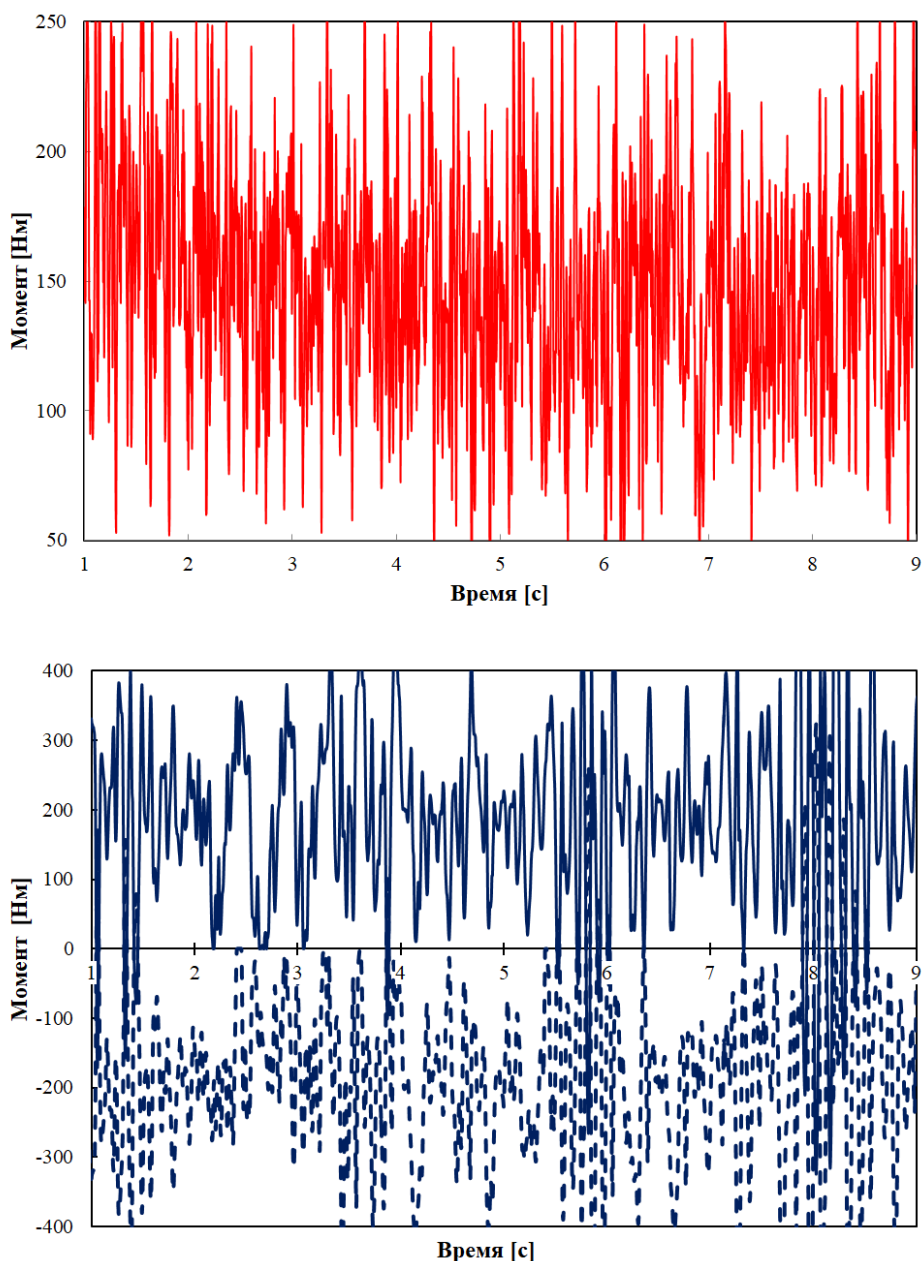


Рис. 6. Примеры положения центра масс МРК в плане сверху (сверху) и скорость на участке 1 (снизу)

На рис. 7 (сверху) приведены примеры изменения крутящего момента на ведущих звездах гусеничных модулей одного борта при прямолинейном движении, на рис. 7 (снизу) – моменты на ведущих колесах гусеничных модулей при повороте.



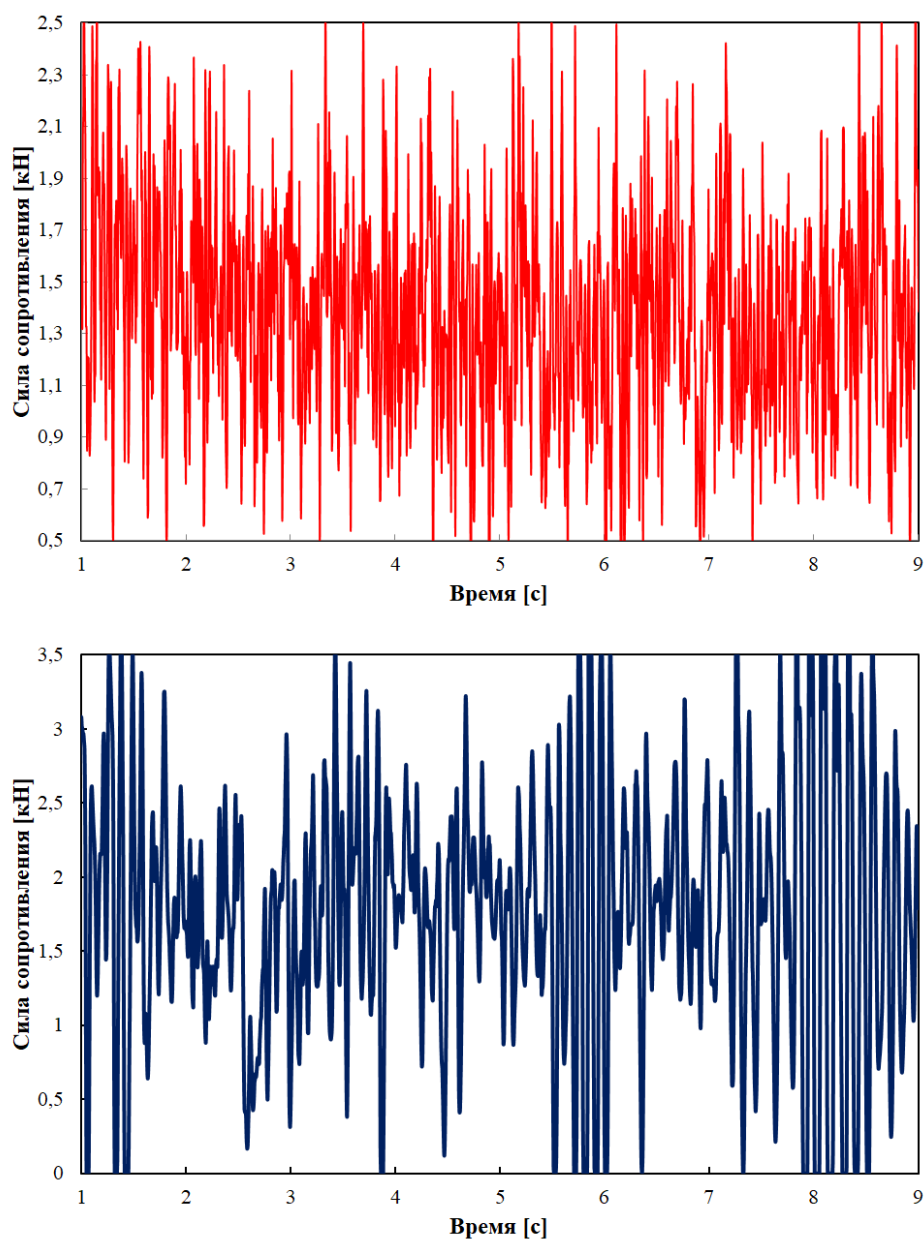
**Рис. 7. Графики изменения крутящего момента на ведущих звездах при прямолинейном движении (сверху) и криволинейном (снизу)**

На графиках на рис. 7 (снизу) положительные значения соответствуют моментам на внешней стороне МРК, отрицательные – на внутренней. Средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении составили 172 Н·м, при криволинейном – 195 и 217 Н·м, соответственно, для отстающего и забегающего бортов шасси. На рис. 8 показано изменение силы суммарной сопротивлению движению для случая прямолинейного (сверху) и криволинейного (снизу) движения. Средние расчетные значения при прямолинейном движении составили 1606 Н, при криволинейном – 1943 Н.

При моделировании значения моментов и сил имеют явные всплески. Это связано с тем, что гусеничная цепь моделируется как взаимодействие конечного числа траков,



и в каждый момент времени их число может быть различным. На практике данная неравномерность сглаживается в резинометаллических шарнирах, а также тем, что гусеничная цепь – не абсолютно жесткое тело. Для расчетов подвижности и эффективности МРК с гусенично-модульным двигателем достаточно использовать средние значения сил и моментов.



**Рис. 8. Графики изменения силы сопротивления при прямолинейном (сверху) и криволинейном движении (снизу)**

Для проверки адекватности разработанной цифровой модели движения МРК по песчаному грунту были сравнены данные математического моделирования с данными эксперимента, проведенного авторами работы в НИЛ «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны.



### Экспериментальные исследования

Для выбора исходных данных для моделирования были проведены экспериментальные данные по замеру параметров опорной поверхности и сопротивления движения МРК [13-15, 21-26].

Определение параметров песчаного основания проводилось с применением поверенного оборудования для испытания грунтов, а именно – грунтового пенетрометра (ПГ-1), показанного на рис. 9 (слева). Для определения статистических характеристик сопротивления пенетрации грунта и связанных с ним модуля упругости, угла внутреннего трения, удельного сцепления грунта, было проведено более тысячи измерений. Дальнейшее увеличение измерений не влияло на величину средних значений и характер распределения. Плотность измерялась путем взвешивания мерных проб грунта в соответствии с ГОСТ 5180-84 методом режущего кольца с применением оборудования ПЛЛ-9. На исследуемую выравненную поверхность грунта устанавливалось режущее кольцо. Далее оно вдавливалось в грунт на 5-10 мм глубже, чем верхний уровень опорной поверхности, при этом сжатия песка внутри кольца не допускалось. Специальной лопаткой грунт порезался ниже нижнего уровня режущего кольца; затем части грунта, выходящего за мерный объем, счищались. Полученный образец помещался в специально подготовленный мерный стакан для последующего взвешивания и определения влажности.



Рис. 9. Определение параметров песчаного опорного основания [21]

В результате были получены характеристики грунта, вошедшие в модель грунта в ATV. Натурные испытания сопротивления движения производились на ровных горизонтальных участках местности. Во время исследований сила сопротивления движению (качению) определяется методом буксирования исследуемой машины. За трос с тензметрическим датчиком силы электронного динамометра ДОУ-3-20И транспортное средство буксировалось со скоростью 1 м/с автомобилем-тягачом. На рис. 10 показана схема определения силы сопротивления.

Разброс значений силы сопротивления был в пределах 1450-1710 Н. Среднее значение составило 1600 Н, максимальное отклонение составило не более 10 %. [21] Эти данные использовались для отладки цифровой модели МРК при прямолинейном движении по песчаному полотну пути.

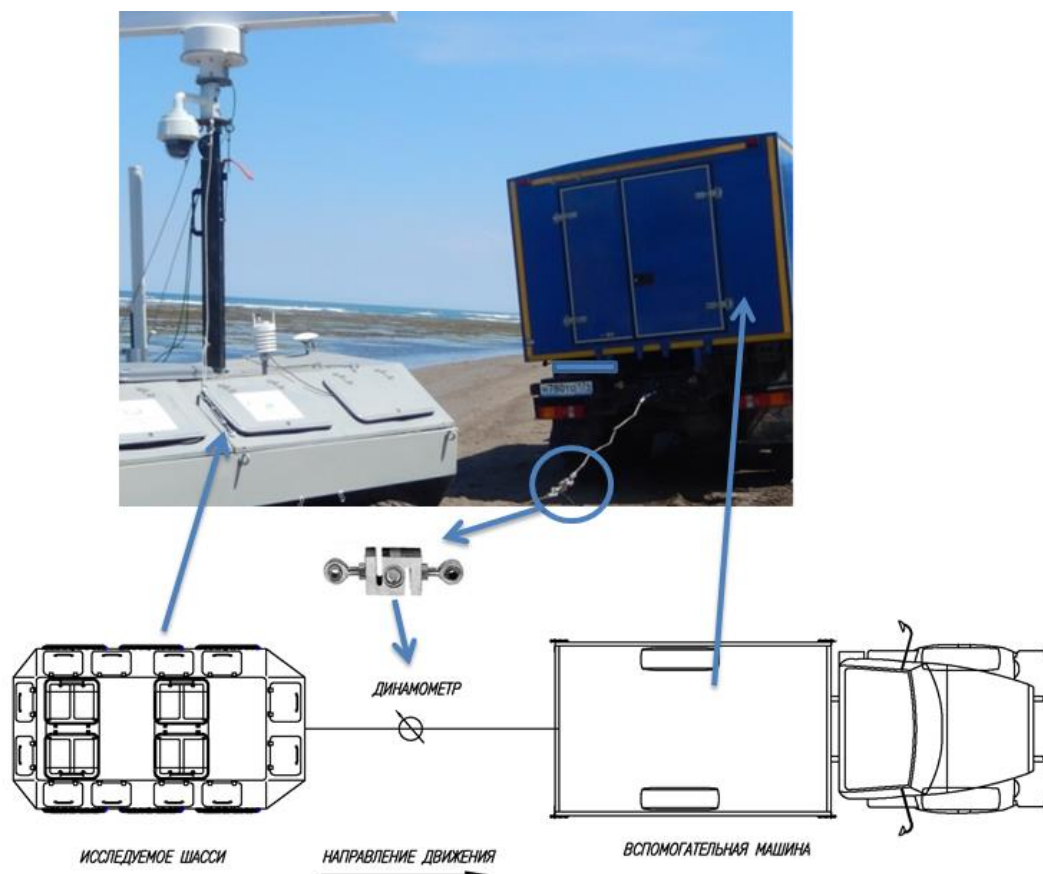


Рис. 10. Схема определения силы сопротивления движения МРК

### Выводы

Создан цифровой двойник позволяющего производить моделирование движения шасси мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию. Использован программный комплекс MSC.ADAMS Tracked Vehicle (ATV). Показаны основные уравнения движения используемые в ATV для моделирования движения машин. Приведены допущения, используемые в модели.

В качестве объекта исследования был выбран мобильный робототехнический комплекс (МРК) для мониторинга прибрежной зоны, разработанный в НИЛ «Моделирование природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Построена модель МРК с гусенично-модульным движителем в программе ATV, учитывающая масово-габаритные характеристики реального объекта. На основании ранее проведенных исследований были получены основные характеристики (модуль упругости, угол внутреннего трения, удельное сцепление грунта, плотность) поверхности движения исследуемого МРК. Определен типовой участок для моделирования МРК, а именно: движение по «С»-образной траектории с выделением 5 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.

Проведено имитационное моделирование движения МРК по песчаному опорному основанию. Построены графики изменения параметров модели во времени. Установлено, что средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении составили 172 Н·м, при повороте с радиусом 5 м 195 и 217 Н·м соответственно для отстающего и забегающего бортов шасси. Средние значения сопротивления движения при прямолинейном движении составили 1606 Н, при криволинейном 1943 Н. Таким образом, прирост сопротивления

движению (суммарного момента на ведущих звездах) при повороте с радиусом 5 м и при движении по песчаному опорному основанию составил порядка 20 %.

В рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны были проведены экспериментальные исследования параметров песчаного опорного основания, которые легли в основу модели упругого грунта в ATV. Средние значения силы сопротивления, полученные на реальном объекте, составили 1600 Н и были использованы для отладки цифровой модели МРК при прямолинейном движении по песчаному полотну пути.

Дальнейшие исследования связаны с моделированием разворота машины с разными радиусами поворота, в том числе, на месте, движением по другим типам опорных оснований, оценке эффективности работы МРК в береговой зоне.

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

### Библиографический список

1. **Barber, D.M.** Vehicle based waveform laser scanning in a coastal environment / D.M. Barber, J.P. Mills // Proceedings of 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Pradua, Italy, 2007.
2. **Beliakov, V.** Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot / V. Beliakov, A. Zaytsev, P. Beresnev, V. Filatov, V. Makarov, D. Tyugin, D. Zeziulin, E. Pelinovsky, A. Yalciner, B. Yalciner, O. Oshmarina, A. Kurkin // Science of Tsunami Hazards. – 2017. – Vol. 36-1. – P.1-12.
3. **Bio, A.** Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies / A. Bio [et al.] // Journal of Integrated Coastal Zone Management. – 2015. – Vol. 15-1. – P. 47-63.
4. **Didier, D.** Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model / D. Didier [et al.] // J. Mar. Sci. Eng. – 2015. – Vol. 3. – P. 560-590.
5. **Incoul, A.** Mobile laser scanning of intertidal zones of beaches using an amphibious vehicle / A. Incoul [et al.] // INGENEO 2014: 6th international conference on engineering surveying, Prague, Czech Republic, 2014. – P. 87-92.
6. **Kramer, J.** Performance of the StreetMapper Mobile LiDAR Mapping System in «Real World» Projects // J. Kramer, G. Hunter // Photogrammetric Week '07, 2007. – P. 215-225.
7. **Kurkin, A.** Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.
8. **Wübbold, F.** Application of an autonomous robot for the collection of nearshore topographic and hydrodynamic measurements / F. Wübbold [et al.] // Coastal Engineering Proceedings. – 2015. – № 1, – P.53.
9. **Zaytsev, A.** Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot / A. Zaytsev, V. Belyakov, P. Beresnev, V. Filatov, V. Makarov, D. Tyugin, D. Zeziulin, E. Pelinovsky, A. Yalciner, B. Yalciner, O. Oshmarina, A. Kurkin, // Science of Tsunami Hazards. – 2015. – Vol. 36. – Issue 1. – P. 1-12.
10. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-175.
11. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 72-77.
12. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание (монография) / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Нижний Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с.

13. **Kurkin, A.** Study of coastal soil surfaces of sakhalin island / A. Kurkin, V. Makarov, D. Zeziulin, P. Beresnev, V. Filatov, D. Porubov // 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.
14. **Kurkin, A.** Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin // International Journal of Imaging and Robotics. – 2017. – Vol. 17-1. – P. 64-75.
15. **Kurkin, A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A. Kurkin, D.Y. Tyugin, V.D. Kuzin, A.G. Chernov, V.S. Makarov, P.O. Beresnev, V.I. Filatov, D.V. Zeziulin // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 459-465.
16. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
17. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Нижний Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
18. Полотно пути транспортно-технологических машин. Учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2014. – 447 с.
19. **Bekker, M.** Theory of land locomotion / M. Bekker. – University of Michigan, Press, 1960. – 520 p.
20. **Wong, J.Y.** Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering / J.Y. Wong. – Elsevier, 2010. – 463 p.
21. **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.
22. **Makarov, V.** Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of sakhalin island (Russian Federation) / V. Makarov, V. Filatov, U. Vahidov, A. Kurkin, V. Belyakov // Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 2017.
23. **Belyaev, A.M.** Field research of drag-and-traction characteristics of mobile robotic system in coastal zone / A.M. Belyaev, V.S. Makarov, A.I. Markovnina, V.V. Belyakov // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1177(1) doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012050.
24. **Belyaev, A.M.** Study of efficiency of a 6x6 all-terrain vehicle in coastal zone / A.M. Belyaev, V.V. Belyakov, V.S. Makarov // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 709(4) doi:10.1088/1757-899X/709/4/044030.
25. **Belyaev, A.M.** Method of assessment of special wheel chassis mobility in cases of sand-gravel bases crossing // A.M. Belyaev, V.S. Makarov // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 194(2) doi:10.1088/1755-1315/194/2/022019.
26. **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, A.A. Zakharov, V.S. Makarov, V.A. Zuyev, V.N. Kravets // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 386(1) doi:10.1088/1757-899X/386/1/012002.

*Дата поступления*

*в редакцию: 01.04.2020*

A.M. Belyaev<sup>1</sup>, A.A. Vasiliev<sup>1</sup>, E.V. Zharkov<sup>2</sup>, V.S. Makarov<sup>1</sup>, V.V. Belyakov<sup>1</sup>

## RESEARCH OF THE MOVEMENT OF A CHASSIS OF A MOBILE ROBOTIC COMPLEX WITH A TRACK-MODULAR MOVER ON A SAND SURFACE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>  
LLC United Engineering Center<sup>2</sup>

**Purpose:** This article discusses the relevance of developing a digital twin of a mobile robotic complex with track-modular mover for modeling curved motion along a deformable sand surface.

**Design / methodology / approach:** The mathematical models used in the Adams Tracked Vehicle (ATV) are reviewed. The simulation of the movement along the "C" -shaped trajectory with the allocation of 5 characteristic sections. Theoretical and experimental data are compared.

**Findings:** As a result of the calculations, the following average values of the moment on one side were obtained with rectilinear movement - 172 Nm, when turning with a radius of 5 meters 195 and 217 Nm, respectively, for lagging and running sides of MRC; the average values of the resistance to movement in a rectilinear motion - 1606 N, when turning with a radius of 5 meters 1943 N. The increase in resistance to movement (total moment on the drive wheel) when turning with a radius of 5 meters and when moving along a sandy surface was about 20%.

**Research limitations/implications:** This study was carried out for MRC with a track-modular mover developed at the Laboratory of Modeling of Natural and Anthropogenic Disasters NNSTU n.a. R.E. Alekseev.

**Originality/value:** A new model of the digital twin of MRC is presented, which allows simulating the movement along a sandy support base. A new approach has been developed to identify new 5 typical sections of the «C» -shaped trajectory.

*Key words:* mobility, modeling, track mover, coastal zone, Adams, ATV, terra-mechanics, mobility, digital twin.