

УДК 629.113

Д.С. Тесленко<sup>1</sup>, В.Ф. Лянг<sup>2</sup>, В.В. Беляков<sup>3</sup>, В.С. Макаров<sup>3</sup>, С.С. Дралкин<sup>2</sup>,  
Д.А. Мартынов<sup>2</sup>, К.И. Зайцев<sup>2</sup>, К.П. Захаркина<sup>2</sup>

## МЕТОД ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОГРУЖЕННЫХ В СНЕГ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт<sup>1</sup>  
Московский политехнический университет<sup>2</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

Представлен метод выбора рациональной формы погруженных в снег корпусных частей автотранспортного средства (АТС) с точки зрения снижения сопротивления движению в глубоком снегу. Метод описан в виде алгоритма. Набором исходных данных для его работы служит база значений сопротивлений для различных геометрических форм и различных типов снега. Значения коэффициента сопротивления формы рассчитываются при помощи дискретно-элементного метода (DEM). Алгоритм по исходным данным пользователя определяет характерные точки на форме погруженных в снег частей АТС и соединяет их теми формами из базы, значения сопротивления которых минимально для данного типа снега. Коэффициенты сопротивления пересчитываются пропорционально размерам форм, усредненная рекомендуемая форма создается на основе статистики о частоте встречи каждого типа снега. Продемонстрирована программная реализация данного алгоритма в виде программного модуля с использованием интерфейса прикладного программирования (API) в САПР Autodesk Inventor. В качестве тестового объекта для демонстрации работы модуля выбран автомобиль повышенной проходимости ГАЗ-64. Разработанный метод может применяться в фирмах, проектирующих АТС повышенной проходимости для нужд народного хозяйства.

*Ключевые слова:* снег, подвижность, сопротивление движению, оптимизация, автотранспортное средство, дискретно-элементный метод.

Современные автотранспортные средства (АТС) прошли длительный путь развития, устойчивыми тенденциями которого являются надежность, снижение себестоимости и расширение диапазона применения в различных отраслях народного хозяйства [1]. В то же время, многие аспекты их эксплуатационных показателей нуждаются в усовершенствовании. Одним из них является подвижность по слабонесущим грунтам, в частности – по снегу [2]. Данная проблема подробно изучена с точки зрения взаимодействия движителя АТС со снегом [3-7], в то время как в отношении взаимодействия корпусных частей АТС остается малоисследованной.

Для моделирования взаимодействия корпусных частей (мостов, раздаточных коробок, защиты картера двигателя, днища и т.д.) существуют методы, позволяющие в первом приближении определить сопротивление АТС при движении в снегу. При этом чисто аналитический подход [8-9], весьма неточен, так как днище здесь рассматривается как плоская пластина. В реальности она сложна: имеет место обилие форм корпусных деталей. Влияние формы объекта на его сопротивление при движении в снегу, а также его ориентация, имеют значение [10]. Конечно-элементные (finite element method, FEM) решения, характерные для работ по взаимодействию движителя со снегом, также нецелесообразны [11], поскольку не учитывают величину сопротивления со стороны снега, уже разрушенного АТС и налипающего на конструкции АТС, либо трущегося по поверхностям АТС. Следовательно, также отсутствует и возможность заранее спрогнозировать форму погруженных элементов, наиболее рациональную с точки зрения снижения сопротивления движению.

Предлагаемый метод оптимизации формы шасси с учетом снижения затрат мощности на взаимодействие элементов кузова и трансмиссии основывается на принципе разбиения

корпуса АТС по зонам, предложенном в статье [11]. При этом для каждой зоны предполагается провести исследование величины сопротивления различных простейших геометрических форм при их буксировке в снегу, затем – выбрать наиболее оптимальную форму для данных условий эксплуатации.

Существующие методы расчета сопротивления с учетом формы предлагаются в аэродинамике, дорожно-строительной технике, гляциологии, судостроении, но для решения данной задачи они неприменимы. Аэродинамические и гидродинамические методы, несмотря на перспективную идею коэффициентов сопротивления тел разной формы, не приспособлены для террамеханических расчетов: даже разрушенный снег все же является твердым телом, и его течение отлично от течения жидкости. Традиционные террамеханические расчеты предназначены для оптимизации формы отвалов строительно-дорожных машин и колес, гусениц, их грунтозацепов; они не рассматривают АТС целиком, фокусируясь на отдельных его элементах довольно простой формы. Инженерная гляциология, с одной стороны, решает задачу, прямо обратную искомой: повышение сопротивления лавиноудерживающих конструкций снежной массе. С другой стороны, ее методы еще более просты, чем у террамеханики и учитывают лишь элементы плоской формы – стены, сетки, бетонные блоки.

По этой причине был выбран относительно новый метод [12-13], предполагающий использование дискретно-элементной (DEM) модели снега совместно с твердотельной моделью буксируемого в виртуальном грунтовом канале тела. Выбор был обусловлен, прежде всего, широкими возможностями DEM по моделированию движения и свойств не только ненарушенного, но и уже подвергшегося разрушению снежного покрова, а также его взаимодействием с поверхностью АТС. Помимо этого, DEM позволяет имитировать эффект налипания снега и даже процессы теплопередачи между телом и снегом, влияющие на обмерзание поверхности. Замена испытаний реальных тел в реальном снегу компьютерными экспериментами, как и предлагалось ранее [14-19], позволила значительно снизить затраты на эксперименты. Такой эффект достигался благодаря отсутствию потребности изготавливать реальные модельные тела и проводить натурные испытания в реальном масштабе.

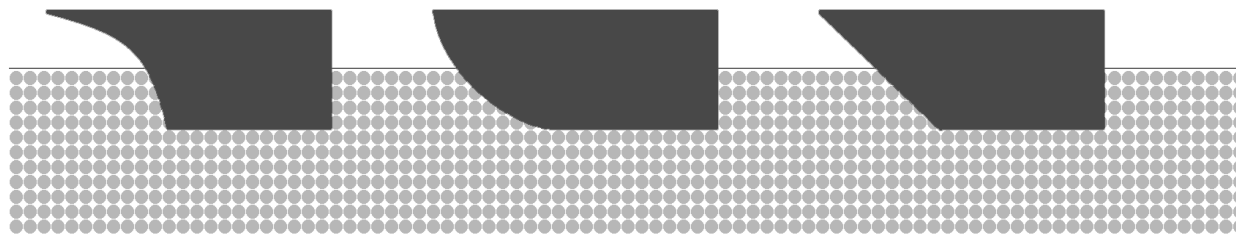


Рис 1. Тестовые тела

В качестве тестовых тел (рис. 1) использовались прямоугольные объекты длиной 200 мм, высотой и шириной 100 мм, с различными типами носовых оконечностей. Протестированы как клиновидные оконечности с углом от 0 до 90° с шагом в 10°, так и радиусные с центром радиуса внутри объекта и снаружи объекта (радиусы от 100 до 1000 мм с шагом в 100 мм). Материалом выбрана углеродистая сталь как наиболее характерный материал для конструкций АТС. Модели испытывались в виртуальном грунтовом канале [20] на скорости 5 км/ч. Программным пакетом для реализации испытаний был выбран DEM Solutions EDEM [13], так как продукт данной компании обладает удобным и наглядным интерфейсом. Специально для этого исследования была получена академическая лицензия у компании-издателя ПО. Моделировалось движение в наиболее распространенных видах снега [16]. С целью упрощения работы были выбраны четыре вида, наиболее часто встречающихся в Нижегородской области [21].

На основе данных экспериментов была создана база данных, описывающая зависимость сопротивления от формы. Главным параметром, характеризующим форму, является коэффициент сопротивления формы  $C_f$ , по аналогии с коэффициентом  $C_x$ , применяемым в аэро- и гидродинамике [22]. Расчет сопротивления объектов с размерами, большими чем имеющиеся в базе, производится пропорциональным пересчетом. В базе содержатся значения сопротивления форм, сопоставленные типам снега.

Выбор оптимальной формы частично основывается на разработанных критериях, описывающих погружение АТС в снег [11]. Исходными данными для работы алгоритма являются сагиттальное и фронтальное (совмещенная площадь по передней и задней оси) сечения АТС, подготавливаемые пользователем в виде эскиза в САД-системе. Если количество осей АТС больше 2, либо днище имеет выступы, сопоставимые размерами с осями, строятся дополнительные фронтальные сечения. Координатная система выбирается согласно ISO 4130:1978 [23] с точкой начала координат, лежащей в центре оси передних колес. Ось абсцисс связанной с АТС системы координат устанавливается против хода движения АТС, ординат – влево по ходу, аппликат – вертикально по нормали к плоскости грунта.

На сагиттальном сечении в координатах  $X$ ,  $Z$  пользователем строятся полилиния (polyline), показывающая очерк погруженных в снег элементов АТС (яркая черная линия на рис. 2). Важно отметить, что линия не продлевается дальше задней оси, но имеет продолжение за переднюю ось, так как вклад заднего свеса в сопротивление минимальный, но вклад передней части весьма весом (так называемое бульдозерное сопротивление) [9]. Также строится линия, показывающая максимально возможный уровень погружения в снег (тонкая серая линия на рис. 2). Исходя из соображений, рассмотренных ранее [11], за этот уровень принимается пол кабины. В качестве наглядной иллюстрации работы алгоритма взяты чертежи полноприводного двухосного автомобиля ГАЗ-64 [24].

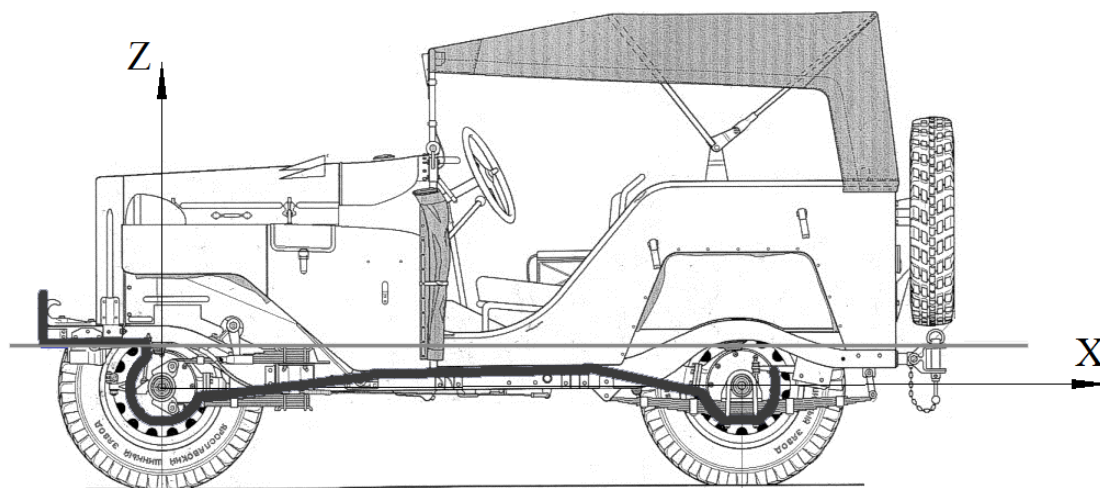


Рис. 2. Исходные данные – сагиттальное сечение АТС

Аналогичная операция проводится с фронтальным сечением в координатах  $Y$ ,  $Z$  (рис. 3). Для наглядности и простоты изложения показано комpositное сечение, содержащее информацию и по передней и по задней оси.

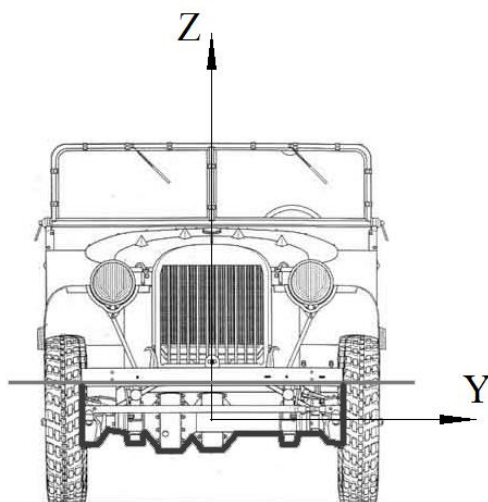


Рис. 3. Исходные данные – фронтальное сечение АТС

Следующим этапом работы алгоритма является определение координат характерных точек 1-3 на сагиттальном сечении (рис. 4). Данная операция выполняется автоматически. Точка 1 определяется как имеющая наименьшую отрицательную координату по оси  $X$  и наименьшую положительную – по  $Z$ . Точка 2 определяется как имеющая наименьшую координату по оси  $Z$ , 3 – как следующая за точкой 2 в порядке возрастания по координате  $Z$ . Характерные точки необходимы для привязки семейств кривых, описывающих форму днища.

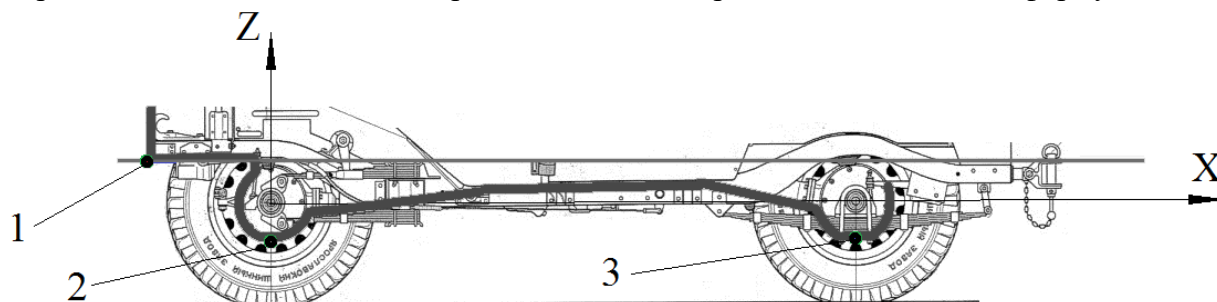


Рис. 4. Поиск характерных точек на сагиттальном сечении

На фронтальном сечении находятся точки с наименьшей координатой по  $Y$  (точка 4 на рис. 5), с наибольшей координатой по  $Y$  (точка 7), с наименьшей координатой по  $Z$ . Точка 5 определяется как имеющая наименьшую координату по оси  $Z$ , 6 – как следующая за точкой 5 в порядке возрастания по координате  $Z$ .

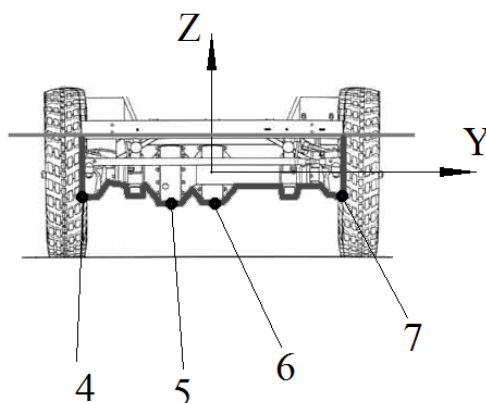


Рис. 5. Поиск характерных точек на фронтальном сечении

Затем точки, полученные на предыдущем этапе, соединяются линиями. Их форма выбирается из вышеупомянутой базы по критерию наименьшего  $C_f$ . Для каждого типа снега будет получена своя кривая. На их семейства кривых строится некая средняя кривая, при этом учитывается «вес» исходных кривых, пропорциональный вероятности [21] появления в реальных дорожных условиях конкретного типа снега, соответствующего данной кривой. Расчет повторяется для сагиттального и для фронтального сечений (рис. 6 и 7), в случае необходимости – для промежуточных сечений модели. На основе средних кривых строится результирующая рекомендуемая поверхность.

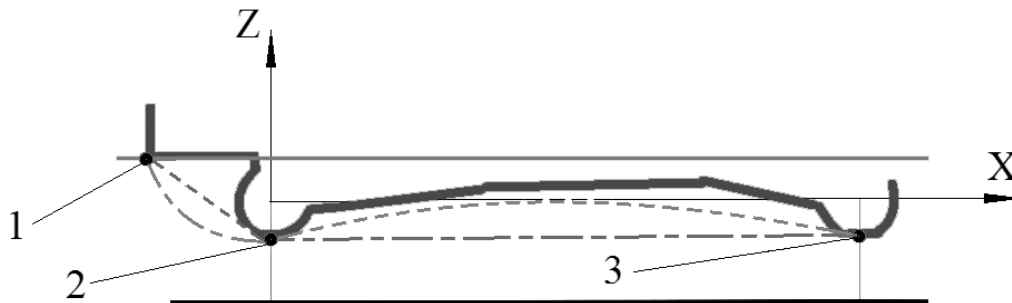


Рис. 6. Построение кривых для двух видов снега на сагиттальном сечении

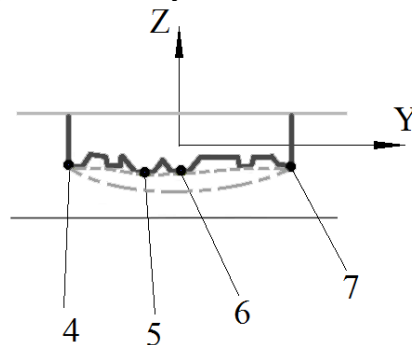


Рис. 7. Построение кривых для двух видов снега на фронтальном сечении

Вышеописанный алгоритм был реализован в виде программного модуля с использованием интерфейса прикладного программирования (API) в САПР Autodesk Inventor (рис. 8), база форм – в MS Excel (табл. 1). Последовательность работы в модуле начинается с создания пользователем в Inventor документа с 2 сечениями – сагиттальным и фронтальным. Сечения строятся пользователем вручную по чертежам либо по 3D-модели АТС. Затем пользователь выбирает данный документ и файл базы форм в окне программы и отдает программе команду начать расчет. Алгоритм находит характерные точки сечений согласно вышеуказанной методике (рис. 9) и соединяет их кривыми, оптимальными для данного типа снега (рис. 10). Полученные кривые аппроксимируются с учетом весов из базы на отдельном эскизе (рис. 11). На основе полученных кривых строится поверхность днища АТС, оптимальной для снижения сопротивления формы (рис. 12).

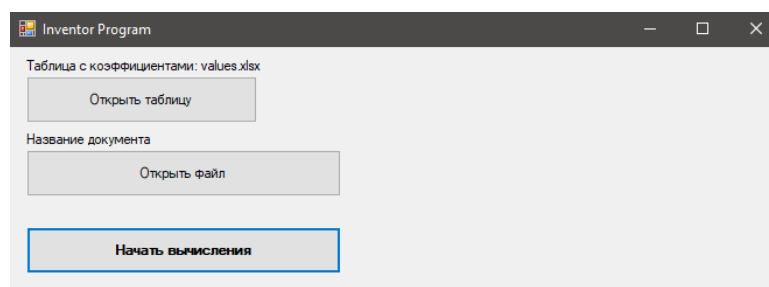


Рис. 8. Диалоговое окно программы

Таблица 1

База форм (фрагмент)

T12	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T23	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T34	Snow_1	Snow_2	Snow_3
line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5
line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8
convexArc_10	10	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8
convexArc_80	11	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9
concaveArc_10	10	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1
concaveArc_80	11	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2
T45	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T56	Snow_1	Snow_2	Snow_3	T67	Snow_1	Snow_2	Snow_3
line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5	line_0	0,3	0,5	0,5
line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8	line_90	0,5	0,8	0,8
convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8	convexArc_10	0,5	0,1	0,8
convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9	convexArc_80	0,8	0,2	0,9
concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1	concaveArc_10	0,9	0,9	0,1
concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2	concaveArc_80	0,96	0,96	0,2

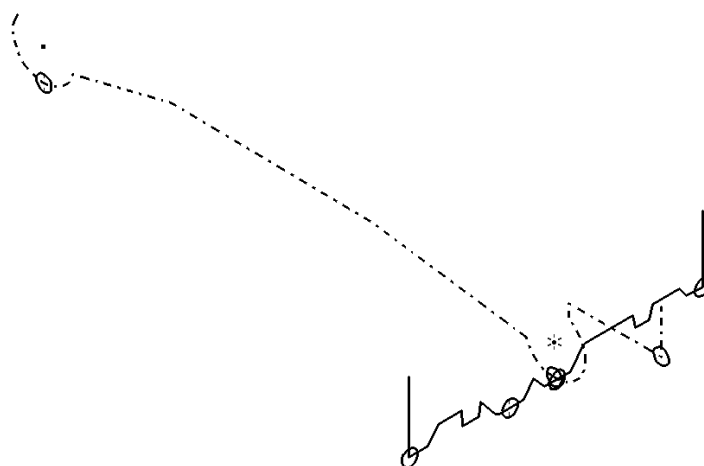


Рис. 9. Обнаруженные характерные точки



Рис. 10. Построенные кривые для различных типов снега

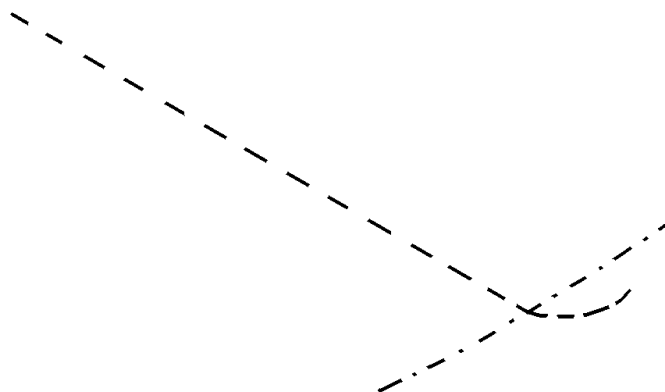
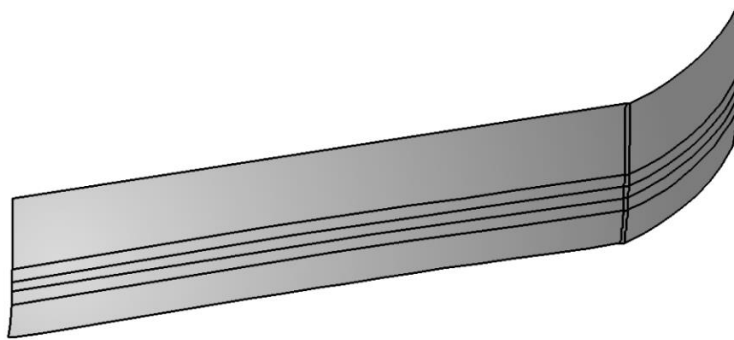


Рис. 11. Полученная аппроксимация кривых



**Рис. 12. Результат работы алгоритма – рекомендуемая поверхность**

Предлагаемый метод достаточно прост в реализации, удобен и нагляден для конструктора. Результатом работы алгоритма являются не численные значения и коэффициенты, а оптимальная с точки зрения снижения сопротивления движению в снегу поверхность днища, находящаяся непосредственно в пространстве моделирования САД-системы, в контексте сборки. Конструктор может либо непосредственно использовать эту поверхность в последующем процессе конструирования днища АТС, либо пользоваться ей как ориентиром при компоновке АТС и построении поверхностей защиты картера, днища и прочих элементов, погруженных в снег.

Основным недостатком метода является то, что он представляет форму нижней поверхности АТС весьма упрощенно. Также не учитывается эффект взаимного влияния отдельных элементов, вес и его распределение по осям АТС, что может значительно сказаться на величине сопротивления движению [10].

Решить первую проблему можно, применяя дискретно-элементный метод не на отдельные фрагменты, а на АТС в целом. Это потребует значительных вычислительных мощностей, но взамен даст реальную картину обтекания всех элементов снегом. Более того, такой подход даст возможность учитывать изменение свойств снега в зависимости от глубины, реализовать достоверное моделирование взаимодействия с настовой доской. Вторая проблема не является принципиально сложной, поскольку существует класс программных пакетов динамики многих тел (multi-body dynamics (MBD)), предназначенных для решения таких задач. Применение MBD даст возможность учитывать не только вес и его распределение, но и работу подвески. Добавление в эту связку FEM – пакета для моделирования характеристик движителя – сделало бы модель движения АТС по снегу или любому другому грунту полностью достоверной.

### Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3(100). – С. 145-175.
2. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин / В.В. Беляков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
4. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу / В.В. Беляков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992.
5. **Беляков, В.В.** Экспериментальные исследования многоколесной машины / В.В.Беляков, К.О. Гончаров, В.С. Макаров // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2010. – № 12. – С. 10.

6. **Беляков, В.В.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21-24.
7. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2013. – №1 – С. 155-160.
8. **Аникин, А.А.** Анализ сопротивления движению гусеничных машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов // Наука и образование (электронное издание). – 2010. – № 8.
9. **Аникин, А.А.** Теория передвижения колесных машин по снегу / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
10. **Шишкин, В.В.** Проходимость лыж / В.В. Шишкин // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: НАМИ, 1950.
11. **Тесленко, Д.С.** Экспресс-метод сравнительной оценки влияния элементов корпуса и других агрегатов на подвижность колесных машин при движении по снегу / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.Е. Колотилин // Труды НАМИ. – 2017. – № 2. – С. 28-36.
12. **Тесленко, Д.С.** Моделирование рабочего процесса плужной снегоуборочной машины при помощи метода дискретных элементов / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 10. – С. 29-33.
13. **Тесленко, Д.С.** Применение метода дискретных элементов для решения задачи повышения проходимости автомобильного транспорта / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Материалы 99 международной научно-технической конференции 20-22 апреля 2017. – С. 270-281.
14. **Тушинский, Г.К.** Инженерная гляциология. / Г.К. Тушинский. – М.: Издательство Московского университета, 1971.
15. **Сазонов, К.Е.** Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег / К.Е. Сазонов. – СПб: РГГМУ, 2004.
16. **Войтковский, К.Ф.** Механические свойства снега / К.Ф. Войтковский. – М.: Наука, 1977.
17. **Москалев, И.Д.** Руководство по снеголавинным работам (временное) / И.Д. Москалев [и др.] – Л: Гидрометеиздат, 1965.
18. **Кондратьев, А.С.** Физико-механические свойства снега и их использование в аэродномном и дорожном строительстве / А.С. Кондратьев, И.В. Крагельский, А.А. Шахов. – М.: АН СССР, 1945.
19. **Вейнберг, Б.П.** Снег, иней, град, ледники / Б.П. Вейнберг. – М.: ОНТИ, 1936.
20. **Тесленко, Д.С.** К вопросу физического моделирования взаимодействия корпуса машины со снегом / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков // Сборник материалов XV международной молодежной научно-технической конференции, 2016. С. 225-226.
21. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № № 1 (102). – С. 136-141.
22. **Евграфов, А.Н.** Аэродинамика автомобиля / А.Н. Евграфов. – М.: МГИУ, 2010.
23. ISO 4130:1978 Транспорт дорожный. Трехмерная система координат и контрольные точки дорожных транспортных средств. Термины и определения. 1978.
24. Газ-64. – Режим доступа: <http://denisovets.ru/gaz/gazpages/gaz64.html> (дата обращения 22.02.2019).
25. **Рукавишников, С.В.** Снегоходные машины / С.В. Рукавишников, Л.В. Барахтанов, А.П. Куляшов, В.И. Ершов. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1986.
26. **Карташов, С.Н.** Физико-механические свойства и процессы формирования снежно-фирнового покрова Восточной Антарктиды / С.Н. Карташов. – М.: АН СССР, 1962.
27. **Кузьмин, П.П.** Физические свойства снежного покрова / П.П. Кузьмин. Л: Гидрометеиздат, 1957.
28. **Анисимов, М.Г.** Снег и снежные обвалы. / М.Г. Анисимов. – М.: АН СССР, 1958.

*Дата поступления  
в редакцию: 01.06.2019*



**D.S. Teslenko<sup>1</sup>, V.F. Lyang<sup>2</sup>, V.V. Belyakov<sup>3</sup>, V.S. Makarov<sup>3</sup>, S.S. Dralkin<sup>2</sup>,  
D.A. Martynov<sup>2</sup>, K.I. Zaycev<sup>2</sup>, K.P. Zakharkina<sup>2</sup>**

**A METHOD OF SELECTING THE RATIONAL SHAPE OF SNOW-IMMERSED  
WHEELED VEHICLE ELEMENTS IN ORDER TO REDUCE  
RESISTANCE TO MOVEMENT**

FSUE «NAMI» State Research Center of the Russian Federation<sup>1</sup>  
Moscow Polytechnic university<sup>2</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>3</sup>

The method of selecting a rational form of snow-immersed vehicle body parts from the point of view of reducing resistance to movement in deep snow is presented. The method is described as an algorithm. The set of initial data for its work is a database of resistance values for different geometric shapes and different types of snow. The form resistance coefficient values are calculated using the discrete element method (DEM). The algorithm determines the characteristic points on the form of snow-immersed parts of the PBX and connects them with those forms of the base, the values of resistance which are the minimum for this type of snow. Then the resistance coefficients are recalculated proportionally to the size of the forms and an average recommended form is created on the basis of statistics on the frequency of each type of snow. The software implementation of the given algorithm in the form of the program module with use of interface of applied programming (API) in CAD Autodesk Inventor is shown. As a test object for demonstration of the module's work, a GAZ-64 cross-country vehicle was chosen. The developed method can be applied in the firms designing the cross-country vehicles.

*Key words:* snow, mobility, resistance to movement, optimization.