

## К ВОПРОСУ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СНЕЖНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ

**А.В. Папунин**

ORCID: 0000-0003-2282-3529 e-mail: [lexa-lenia@rambler.ru](mailto:lexa-lenia@rambler.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**В.В. Беляков**

ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: [nauka@nntu.ru](mailto:nauka@nntu.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.А. Аникин**

ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: [anikin.zvm@mail.ru](mailto:anikin.zvm@mail.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**В.Н. Наумов**

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: [vn.naumov1941@yandex.ru](mailto:vn.naumov1941@yandex.ru)

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия*

**В.С. Макаров**

ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: [makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена классификация дискретных снежных препятствий на основании разных отличительных признаков, а именно: наличия целевого фактора, типа источника формирования, структуры и степени постоянства источника формирования, физико-механических свойств, состава и формы дискретного препятствия. Представлена математическая модель, описывающая геометрию снежных наметов. Даны зависимости для расчета сил сопротивления от вертикального смятия снега и силы тяги, а также зависимость для расчета динамического преодоления дискретных снежных препятствий. Приведены результаты расчетов минимальной скорости преодоления снежных наметов без застревания, а также предельного расстояния, которое проедет машина со скоростью 5 м/с. Определена новая структура подвижности по проходимости, наряду с профильной и опорной проходимостью и преодолением водных преград, включающая новое понятие «дискретная проходимость».

**Ключевые слова:** проходимость, дискретные препятствия, снег.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Папунин, А.В. К вопросу преодоления дискретных снежных препятствий транспортно-технологическими машинами / А.В. Папунин, В.В. Беляков, А.А. Аникин, В.Н. Наумов, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 94-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_94

## ON THE ISSUE OF OVERCOMING OF DISCRETE SNOW OBSTACLES BY TRANSPORT-AND-TECHNOLOGICAL VEHICLES

**A.V. Papunin**

ORCID: 0000-0003-2282-3529 e-mail: [lexa-lenia@rambler.ru](mailto:lexa-lenia@rambler.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.V. Belyakov**

ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: [nauka@nntu.ru](mailto:nauka@nntu.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Anikin**

ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: [anikin.zvm@mail.ru](mailto:anikin.zvm@mail.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.N. Naumov**

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: [vn.naumov1941@yandex.ru](mailto:vn.naumov1941@yandex.ru)

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**V.S. Makarov**

ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: [makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Classification of discrete snow obstacles is considered on the basis of various distinctive features, namely: presence of a target factor, the type of formation source, the structure and degree of the formation source constancy, physical and mechanical properties, composition and shape of a discrete obstacle. Mathematical model describing the snowflush geometry, is presented. Dependences are given for calculating of the resistance forces against the vertical crushing of snow, and the traction force, as well as dependence for calculation of the dynamic overcoming of discrete snow obstacles. Results of calculations of the minimum speed of overcoming of snowflush without getting stuck, as well as the maximum distance that a vehicle will travel at a speed of 5 m/s, are presented. A new structure of mobility as per cross-country ability is determined, along with profile and reference cross-country ability and overcoming of water obstacles, including a new concept of «discrete cross-country ability».

**Key words:** cross-country ability, discrete obstacles, snow.

**FOR CITATION:** A.V. Papunin, V.V. Belyakov, A.A. Anikin, V.N. Naumov, V.S. Makarov. On the issue of overcoming of discrete snow obstacles by transport-and-technological vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 94-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_94

### Введение

В классической теории проходимость транспортного средства определяется как способность автомобиля преодолевать различные дорожные препятствия и двигаться по дорогам, не имеющим твердого покрытия, и по бездорожью. Проходимость является составной частью подвижности – интегрального эксплуатационного свойства транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющего способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е. возможность противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2]. Принято различать проходимость профильную и

опорную [3], также в отдельную группу выделяют преодоление водных преград. Проведенные ранее исследования позволяют сделать вывод о целесообразности выделения дискретной проходимости – способности преодолевать препятствия дискретного характера путем маневрирования или с учетом динамики транспортного средства. Например, движение в лесу является по сути маневрированием между деревьями и преодолением их как дискретных препятствий, еще одним их примером являются снежные наносы. Они непродолжительны по длине, но их нельзя преодолеть, если ехать равномерно, поэтому движение автомобиля в данных условиях возможно только при динамическом преодолении или с разгона.

На рис. 1 приведена структура подвижности по проходимости ТТМ.

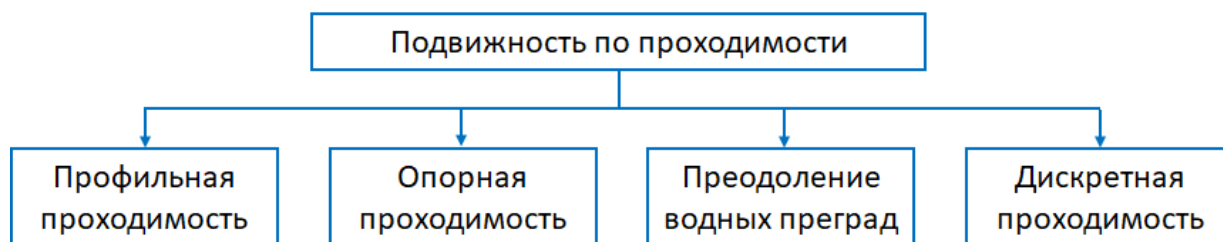


Рис. 1. Структура подвижности по проходимости

Fig. 1. Flotation mobility structure

### К вопросу преодоления участков местности с переменной высотой снежного покрова

Рассматривая передвижение по снежному полотну пути, необходимо учитывать множество факторов, характеризующих как само транспортное средство (ТС), так и особенности снежного покрова. В большинстве работ оценку подвижности ТС принято проводить, исходя из решения квазистатических задач. При этом параметры машины и опорного основания считаются постоянными. Также задача может решаться путем перебора исследуемых параметров. Применительно к движению ТС по снегу, в большинстве случаев задаются конкретными массово-габаритными параметрами машин (полная масса, размеры движителя) и физико-механическими и геометрическими параметрами снежного покрова (высота и плотность) [4, 5]. Для определения качественных показателей при сравнении разных образцов техники данный подход уместен и не подлежит сомнению. Примером может служить передвижение по снежной целине, протяженным полям и участкам местности. С позиции обеспечения подвижности по проходимости особый интерес представляют случаи, при которых происходит локальное изменение условий движения как по времени, так и в пространстве, или дискретные препятствия. При этом оценку протяженности необходимо соотносить с траекторией движения и размерами самого ТС. Так, например, фактически канава или балка, засыпанная снегом и имеющая протяженность в продольном направлении несколько сотен метров, а в поперечном будучи соизмеримой с длиной машины, при условии того, что ТС пересекает ее не вдоль, а поперек, также будет являться дискретным препятствием. На долю таких участков приходится небольшой процент пути, но потеря подвижности по проходимости в данном случае составляет подавляющие значения. В данном случае необходимо отметить, что для каждой машины оценивается возможность движения прямолинейно. При этом в зависимости от типа движителя и системы управления курсовым движением сопротивление движения может быть разным. Так, для разных конструкций колесных машин рост сопротивления при повороте может быть от 30 до 80 %. Отметим, что для оценки преодоления дискретных препятствий необходимо проводить расчеты именно для прямолинейного движения. Данное требование обусловлено также практическим опытом движения по заснеженной местности.

Таким образом, если с точки зрения выбора эффективного ТС существуют методики расчета, результатом которого является выбор лучшей машины с позиции движения по снегу

с постоянными или условно постоянными условиями движения, то далее для каждой выбранной машины необходимо оценить возможность преодоления дискретных препятствий в виде снежных заносов, насыпей и пр. Формирование неравномерности в высоте снежного покрова обусловлено механикой движения снежных частиц в метелевом потоке и задержания их у различных преград [6]. Для лучшего понимания представим классификацию дискретных снежных препятствий как полотна пути для транспортно-технологических машин.

### **Классификация дискретных снежных препятствий**

Глобально дискретные снежные препятствия можно разделить на естественные и искусственные. При этом необходимо разяснить данный параметр разделения, а именно разделение по наличию целевого антропогенного фактора. К естественным можно отнести специфику формирования снежных наносов на объектах естественного природного характера, а также на объектах рельефа полученных в процессе антропогенного воздействия и не ставящих своей целью формирование снежного покрова. К искусственным можно отнести такие объекты, которые формируются при целевом воздействии человека. Здесь можно выделить две разновидности. Первая – это снегозадерживающие устройства, например, служащие для защиты дорог от снега, а также для снегоудержания. Вторая возникает при удалении снега с дорог разного типа и формирует так называемые отвалы и обочины дорог. Как и в первом, так и во втором случаях подход к формированию высоты снежного покрова похож. Также характер формирования снежных наносов во многом зависит от мест формирования снежных масс. Здесь можно выделить следующий классификационный признак, а именно: по типу деформируемости источника формирования наносов. Первым классификационным признаком будет недеформируемый (например, протяженные объекты макропрофиля: рвы канавы, опушки леса, берега рек, обрывы, склоны, или отдельные объекты типа пней, камней), вторым – деформируемый. Так, хорошо известно, что высота снега на болотах с порослью камыша и тонких веток много больше, чем на открытой воде. При этом сложности для передвижения данные участки не представляют, так как растительность, служащая основанием для формирования снежного покрова, гнется и ломается при движении ТС.

В зависимости от характера участка можно выделить различные структуры снежного покрова: естественную, формируемую снегопадами и оттепелями, а также естественными процессами, происходящими внутри снежного покрова. Фактически данная структура может представлять несколько слоев разной плотности, структуры и текстуры. Следующие типы во многом зависят от специфики расчистки дорог. Для обочин дорог, очищаемых с помощью снегоочистителей и отбрасывающих снег в сторону, формируется слоистая структура из естественно выпавшего снега и после фрезерования. Если очистка дорог производится путем сгребания, формируются спрессованные отвалы вблизи обочин, имеющие большую плотность снега. Еще одним классификационным признаком является состав снежного покрова. Можно выделить естественный, включающий снег и лед, характерные для большинства местностей, снежной целины и очищаемых от снега немагистральных дорог, а также микст, состоящий из льда, снега и других компонентов. Различают миксты с механическими включениями типа песка или мелкой каменной крошки, а также с химико-механическими добавками (противогололедные реагенты). И в том, и в другом случае физико-механические характеристики опорного основания будут разными.

Снег, в зависимости от его состава и структуры, будет различаться по физико-механическим свойствам, а именно с позиции оценки подвижности ТТМ, сдвиговых и деформационных характеристик. В данном случае эти параметры зависят от структуры, текстуры, химико-механического состава. С позиции постоянства источника формирования можно выделить постоянные параметры, которые неизменны в течении снежного периода, например, естественные препятствия и объекты снегозадержания; в данном случае высота снега будет соразмерна осадкам. Непостоянные параметры меняются, например, при очистке дорог ве-

личина отвала меняется по мере выпадения и очистки снега, соответственно, изменяются источники формирования заносов и пр. В данном случае величина снежных наносов не будет превышать допустимых, после которых потребуется расчистка дорог. Для всех вышеописанных случаев должна быть классификация в зависимости от формы опорного основания. Можно выделить формы снежных наносов на образующихся на ровной поверхности, как правило, на некотором удалении от источников формирования и обусловленных спецификой движения воздушных масс, а также на препятствиях сложной формы. При этом целесообразно воспользоваться подходом [7-9], где описаны снежные наносы и их формы, образующиеся в зависимости от ветра и формы подстилающей поверхности.

На рис. 2 представлена классификация дискретных снежных препятствий.

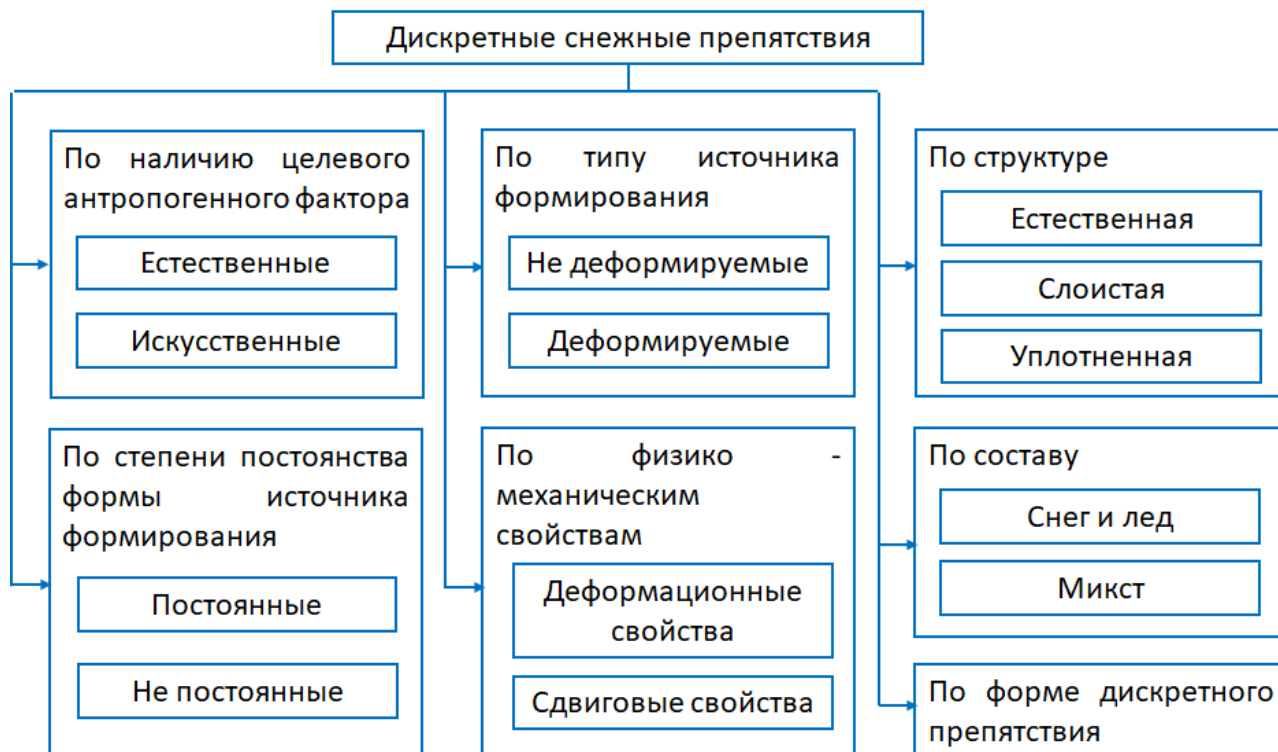


Рис. 2. Классификация дискретных снежных препятствий

Fig. 2. Classification of discrete snow obstacles

### Формализованное представление формы снежного дискретного препятствия с точки зрения возможности его преодоления с помощью ТС

Была рассмотрена классификация дискретных снежных препятствий. С позиции геометрии формирования снежных наносов можно выделить несколько условных форм. Они будут отличаться в зависимости от формы опорной поверхности. Также для оценки проходимости при разных формах препятствий необходима адекватная оценка. При этом необходимо задаться условием, что объем снежного наноса на локальном участке одинаков для различных его форм. Это позволит в некоторой степени в равных условиях оценивать подвижность при преодолении дискретных снежных препятствий.

Предлагается форму снежных наносов описывать следующей зависимостью:

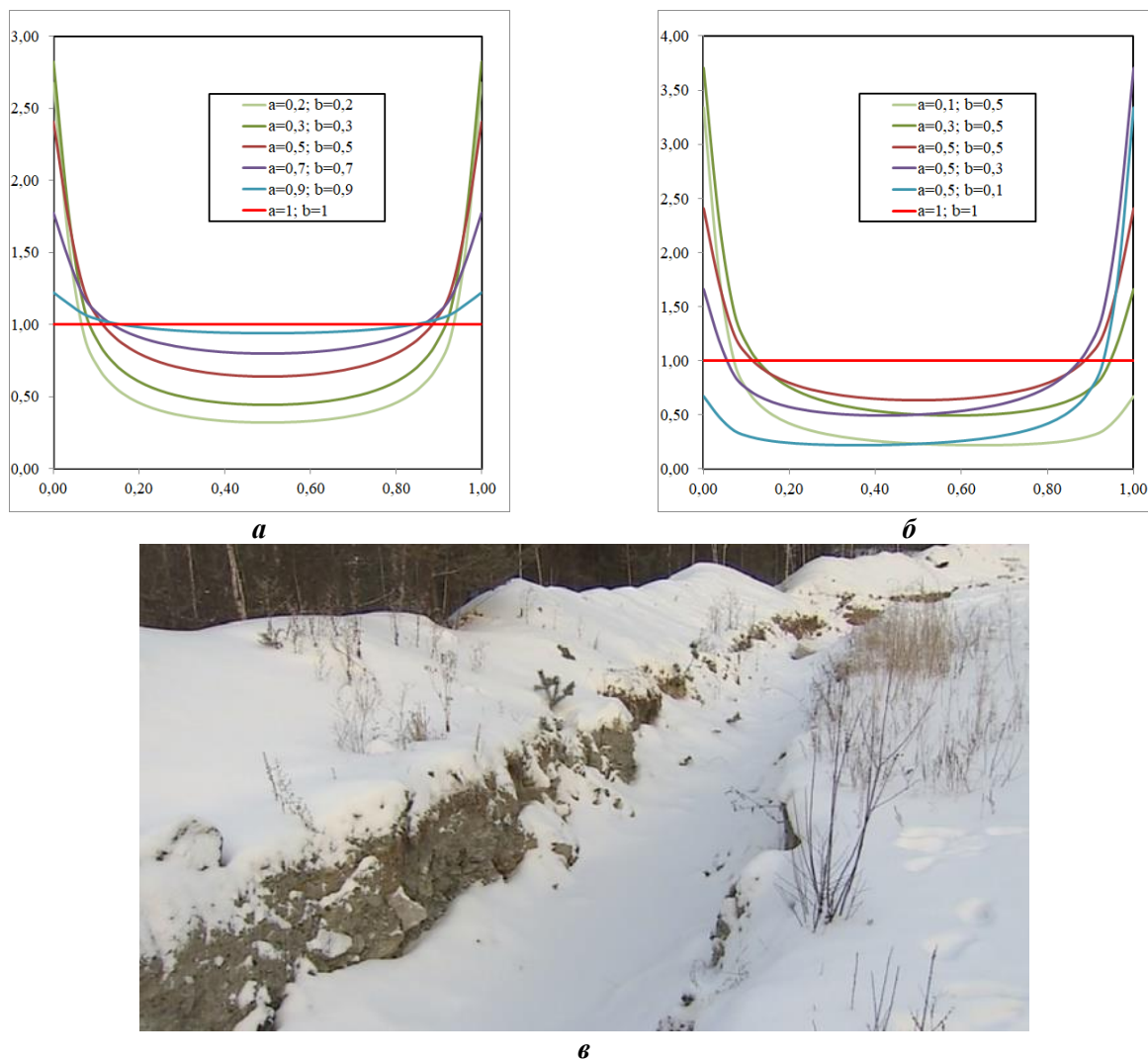
$$H(l) = \frac{s}{(B-A)B(\alpha, \beta)} \left( \frac{l-A}{B-A} \right)^{\alpha-1} \left( \frac{B-l}{B-A} \right)^{\beta-1}, \quad (1)$$

где  $H(l)$  – высота снега в зависимости от протяженности,  $\alpha, \beta > 0$  – произвольные фиксированные параметры,  $\alpha$  определяет форму распределения,  $\beta$  определяет масштаб,  $A \leq l \leq B$  –

границы изменения параметра  $l$ ,  $S$  – площадь снежного наноса в продольном сечении,  $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 l^{\alpha-1}(1-l)^{\beta-1} dl$  – бета-функция.

В зависимости от параметров, входящих в формулу, будет отличаться характер кривой, описывающей геометрию снежного наноса. Рассмотрим разные случаи. Для наглядности, графики сопоставим с реальными наносами снега.

1.  $\alpha < 1, \beta < 1$  – график выпуклый и уходит в «бесконечность» на границах. При  $\alpha = \beta = 1$  слой снега будет равномерным.



**Рис. 3. Пример формирования снега во рве**

**Fig. 3. Example of snow formation in the moat**

2.  $\alpha < 1, \beta \geq 1$  – график выпуклый и уходит в «бесконечность» на границе.

Любая снежная поверхность будет формировать сопротивление движению ТС. Как было сказано выше, обычно проходимость ТТМ оценивается при движении по снегу в квазистатической постановке, а именно: рассчитываются сила тяги и сопротивления при равномерном движении. При этом динамика преодоления дискретных (локальных) препятствий за счет сил инерции не рассматривается. Рассмотрим подход, учитывающий динамическое преодоление дискретных снежных препятствий.

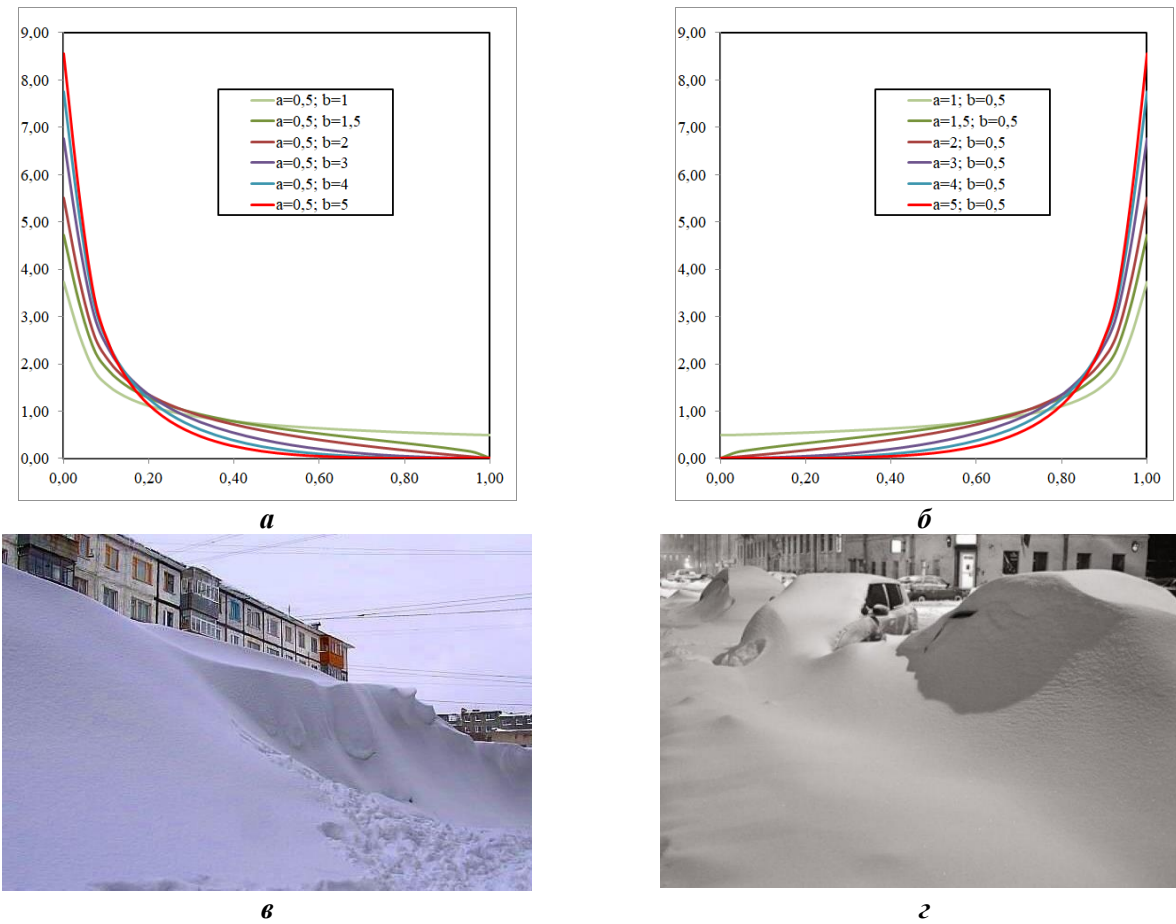


Рис. 4. Пример формирования снега около стенки

Fig. 4. Example of snow formation near the wall

3.  $\alpha > 1, \beta > 1$  – график унимодальный. При  $\alpha = \beta$  слой снега будет иметь симметричный характер.

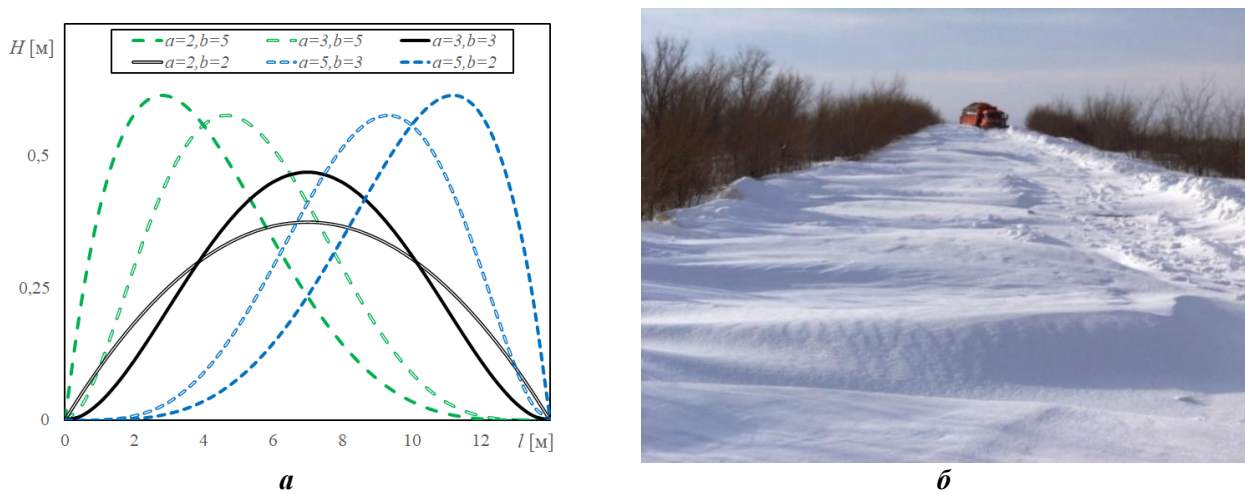


Рис. 5. Пример формирования намета снега

Fig. 5. Example of formation of snow drift

### Расчет сил при преодолении дискретных снежных препятствий

В работах [4, 10] приводятся зависимости для расчета сопротивления движению. Сила сопротивления рассчитывается по зависимости:

$$F_f = b \gamma h_{\max}^2 \left[ -\ln \left( \frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} - q_{\max}} \right) - \left( \frac{q_{\max}}{\gamma h_{\max} - q_{\max}} \right) \right], \quad (2)$$

где  $b$  – ширина движителя,  $\gamma$  – начальная жесткость снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости в начальной стадии деформации,  $h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению,  $q_{\max}$  – максимальное давление под движителем.

Сила тяги по сцеплению движителя со снегом определяется по зависимости:

$$F_\varphi = \int dF_\varphi, \quad dF_\varphi = dF_{\varphi r} + dF_{\varphi c} \quad (3)$$

где  $dF_{\varphi r}$  – составляющая от элементарной реакции от трения материала шины об опорную поверхность,  $dF_{\varphi c}$  – составляющая элементарной тангенциальной реакции от сопротивления сдвигу. Более подробно параметры, входящие в (2) и (3) рассмотрены в [4, 10, 11]

Условием возможности движения при динамическом преодолении препятствий будет:

$$F_\varphi \geq F_k \geq F_f + m \frac{dv}{dt}, \quad (4)$$

где  $F_k$  – сила тяги на движителе,  $m$  – масс ТС,  $\frac{dv}{dt}$  – ускорение (замедление). При расчетах выбирается меньшее значение из  $F_\varphi$  и  $F_k$ .

### Определение параметров дискретной проходимости при движении через снежные наносы различной формы

Рассмотрим, как как меняется скорость и ускорение ТС в зависимости от того, как оно проезжает снежные наметы разной формы. Приняты допущения, что снег однороден по высоте и соответствует «снегу-3» [4, 10], нагрузка на колесо 500 кг, ширина 20 см, а также то, что скорость не поднимается выше максимальной заданной. На графиках показаны значения ускорений, которые могут быть по условию реализации максимально возможной силы тяги. По потере проходимости можно судить, когда скорость будет равна нулю. На рис. 6 показаны снежные наметы площадью сечения 5 м<sup>2</sup>, протяженностью 14 м, с физико-механическими характеристиками, соответствующими «снегу-3». Параметры распределения в формуле (3) соответственно равны  $\alpha$  и  $\beta$  следующим значениям  $\alpha = 5, \beta = 3$  (рис. 6 а),  $\alpha = 3, \beta = 5$  (рис. 6 б),  $\alpha = 5, \beta = 2$  (рис. 6 в),  $\alpha = 2, \beta = 5$  (рис. 6 г),  $\alpha = 3, \beta = 3$  (рис. 6 д),  $\alpha = 2, \beta = 2$  (рис. 6 е).

Как видно из графиков на рис. 6, форма снежных наметов влияет как на минимальную скорость прохождения дискретных снежных препятствий, так и на расстояние, которое проедет машина с определенной скоростью до момента потери подвижности транспортным средством. Минимальной скоростью прохождения снежных наметов будут:  $V_{\min} = 5,7$  м/с (рис. 6 а),  $V_{\min} = 5,8$  м/с (рис. 6 б),  $V_{\min} = 6$  м/с (рис. 6 в, г),  $V_{\min} = 4,9$  м/с (рис. 6 д),  $V_{\min} = 5,5$  м/с (рис. 6 е). Предельными расстояниями, которое проедет машина со скоростью  $V = 5$  м/с до момента потери подвижности будут значения около  $L = 10,6$  м (рис. 6 а),  $L = 6,4$  м (рис. 6 б),  $L = 12$  м (рис. 6 в),  $L = 4,5$  м (рис. 6 г), участки на рис. 6 д, е при скорости 5 м/с преодолевается без потери подвижности.



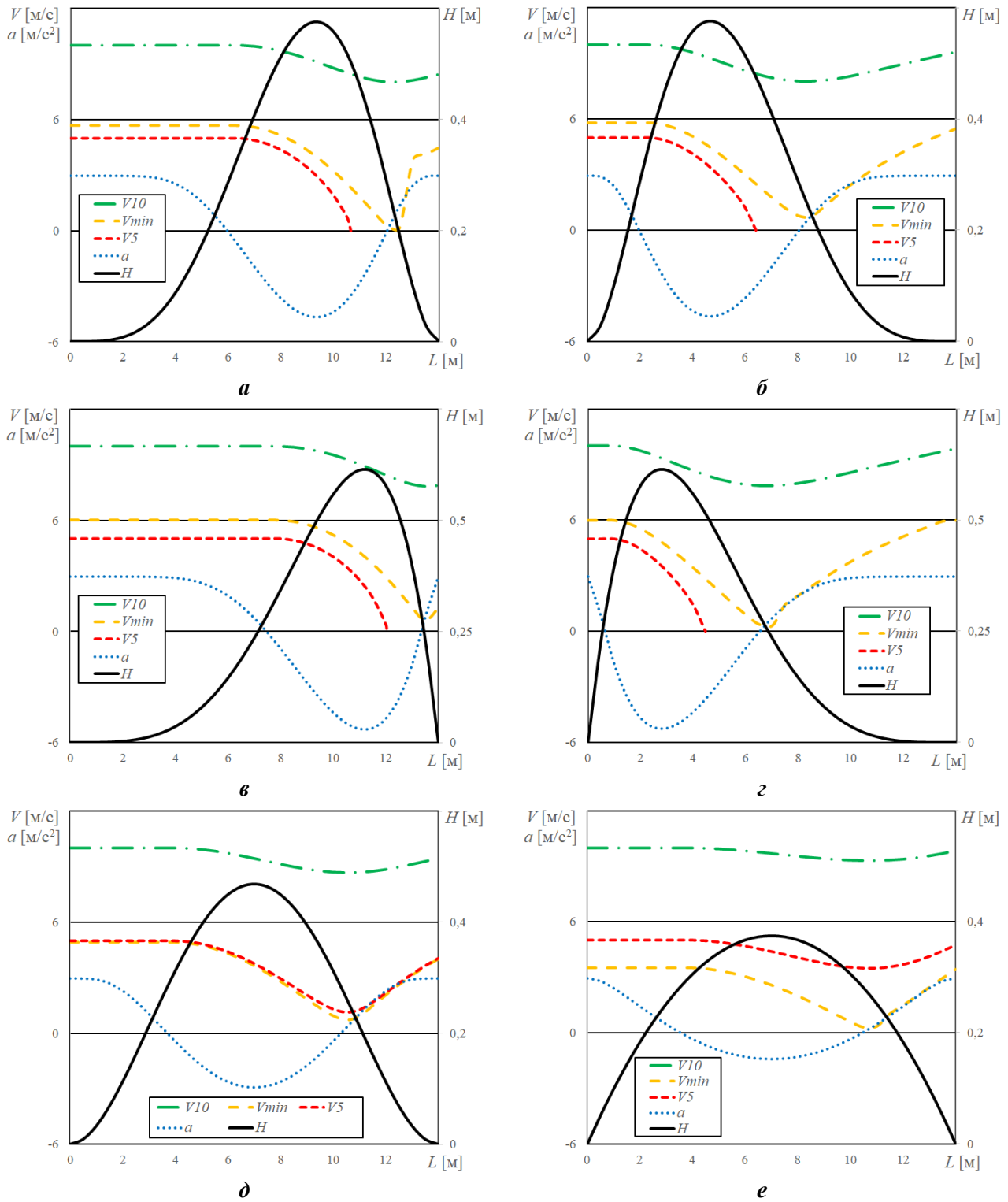


Рис. 6. Характер изменения скоростей движения и ускорений в зависимости от формы снежных наметов

Fig. 6. Patterns of moving speeds and accelerations depending on the shape of snow drifts

## Выводы

На основании проведенного исследования определена новая структура подвижности по проходимости, наряду с профильной и опорной проходимостью и преодолением водных преград, включающая новое понятие «дискретная проходимость». Приведена новая классификация дискретных снежных препятствий по ряду отличительных признаков: наличие целевого фактора (естественные и искусственные), наличие источника формирования (недеформируемые и деформируемые), по структуре (естественная, слоистая, уплотненная), по степени постоянства источника формирования (постоянная и непостоянная), по физико-механическим свойствам (сдвиговым и деформационным), по составу (снег и лед, микст) и по форме дискретного препятствия. Предложена математическая зависимость, позволяющая описывать форму снежных наносов в зависимости от формы подстилающей поверхности, а также от параметров, входящих в формулу и определяющих изменение высоты снега в зависимости от протяженности снежного намета и площади поперечного сечения.

Приведены зависимости для расчета сил сопротивления от вертикального смятия снега и силы тяги. Описано условие движение транспортного средства с учетом динамики преодоления дискретных снежных препятствий. Представлены результаты расчетов для «снега-3» и машины с нагрузкой на колесо 500 кг и шириной движителя 20 см. Определены минимальные скорости преодоления снежных наметов без застревания для шести разных форм дискретных препятствий и одинаковой площади сечения. Рассчитаны предельные расстояния, которые проедет машина со скоростью 5 м/с.

В дальнейшем планируется изучение влияния параметров подстилающей поверхности, направления ветра, его скорости, наличия оттепелей и метелей на форму дискретных снежных препятствий. Также будет рассмотрено, как изменяются структура, наличие ледяных корок, плотность, размеры и форма кристаллов снега, зависящие от множества факторов.

*Данная работа является продолжением исследований, проводимых в «Нижегородской научно-практической школе транспортного снеговедения» в рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук МК-336.2022.4.*

## Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-174.
2. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 72-77.
3. **Папунин, А.В.** Методика расчета, выбора и оценка основных параметров движителя многоосной колесной машины при преодолении разрушаемых препятствий: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород, 2019. – 175 с.
4. **Барахтанов, Л.В.** Снегоходные машины/ Л.В. Барахтанов и др. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
5. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон: диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород: НГТУ, 2017. – 321 с.
6. **Дюнин, А.К.** В царстве снега / А.К. Дюнин. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. – 161 с.
7. **Куляшов, А.П.** Зимнее содержание дорог / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // НГТУ. – изд.2., испр. и доп. – Нижний Новгород. 2012. – 369 с.
8. **Рихтер, Г.Д.** Снежный покров, его формирование и свойства / Г.Д. Рихтер. – Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1945. – 120 с.

9. **Шапкин, В. А.** Основы теории движения машин с роторно-винтовым движителем по заснеженной местности: диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 2001. – 389 с.
10. **Малыгин, В.А.** Исследование процесса деформации снега под воздействием гусеничного движителя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных машин: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1971. – 155 с.
11. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 – Нижний Новгород, 2009. – 165 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 01.04.2022*