

УДК 629.113

**В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов., В.Е. Колотилин, Ю.И. Молев,
В.А. Шапкин, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров**

ОБ ОЦЕНКЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ СНЕГОХОДНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматриваются процессы воздействия движительных систем вездеходных машин на заснеженную почвенно-грунтовую поверхность, приводящие к изменению температурных полей на глубине зимовки растений, их частичному вымерзанию и снижению урожайности. Предлагается использование в качестве одного из критериев оценки потребительских свойств снегоходных машин относительное снижение урожайности растительного покрова полотна пути.

Ключевые слова: транспортно-технологические машины, снежный покров, заснеженное бездорожье, движитель, температурные поля, экологичность транспортно-технологической машины, глубина промерзания, биомасса растений.

Введение

Учитывая масштабы применения внедорожных машин и особенности их функционирования в различных дорожных условиях, а также особую ранимость природных ландшафтов северных широт, представляется обязательным проведение глубоких и всесторонних исследований экологических последствий эксплуатации вездеходной техники на почвенно-растительном покрове.

В известных аналитических исследованиях принимаются во внимание нарушение санитарно-гигиенических норм, истощение природных ресурсов, в целом - сокращение биологической продуктивности ландшафта [34], [35]. Грунтовые поверхности (поля, луга, почвы лесов) под воздействием движителей и рабочих органов технологических машин испытывают вибрационное воздействие, уплотнение почвы и, как результат, повреждение корней, уничтожение растений, включая поросль деревьев и кустарников [34].

Экологичность, или экологическая совместимость, движителей транспортно технологических машин (ТТМ) с опорной поверхностью рассмотрена в ряде работ [14], [18–22], [28], [29], [36]. Здесь введено понятие экологичности движителей с точки зрения минимизации поранения почвенно-растительного покрова, а совместимость движителя со средой оценивается экспертно в сравнении известных движителей между собой. Практически, во всех работах отсутствуют универсальные количественные оценки.

Наиболее экологичными, экологически безопасными представляются снегоходные машины, однако это не так.

На заснеженном бездорожье существенно изменяются под воздействием сжимающих нагрузок температурные поля в снежном покрове. Изменение температуры на глубине зимовки растений, произошедшее в результате воздействия движителей транспортных средств, в определенной зависимости приводит к снижению биологической массы растений от температуры на глубине их зимовки [7], [28], [36].

Все это показывает, что качество транспортно-технологических снегоходных машин должно соответствовать требованиям защиты почвенно-растительного покрова и ландшафта в целом, а критерии оценки их качества должны включать соответствующие количественные показатели.

Многокритериальная оценка качества ТТМ [5] включает критерии проходимости, эффективности, подвижности, конкурентоспособности. Многокритериальный подход к оценке

потребительских свойств ТТМ, очевидно, позволяет выявить выгоды потребителя в весьма точно описанных условиях эксплуатации (например, заснеженная местность с указанием предельных высот снежного покрова).

Анализ системы «местность – машина» (например, в случае описания критерия проходимости) включает такие факторы, как физико-механические свойства грунта, определяющие его несущую способность и погружение движителя машины (глубину колеи).

Критерий эффективности предполагает сравнение результатов деятельности с затратами на их получение. Рекомендуется различать экономическую, научно-техническую, социальную, экологическую, техническую эффективность.

Все предложенные показатели (критерии) позволяют судить о качестве машины по результатам транспортной работы (преодолеть расстояние, переместить груз и т.п.), т. е., в некотором смысле, копируют подход к оценке результатов транспортной работы машин, эксплуатирующихся на подготовленном полотне пути (на дорогах с усовершенствованным покрытием).

Исходя из возможных негативных последствий воздействия движителя ТТМ на почву (грунт) эффективность эксплуатации вездеходной машины может быть существенно снижена вплоть до получения отрицательного экономического эффекта.

В связи с этим, оценка результатов работы ТТМ, работающих в условиях бездорожья, должна включать дополнительные ограничения, связанные с последствиями воздействия ТТМ на почву (грунт).

Моделирование экологических последствий

Рассмотрим на примере снегоходных ТТМ возможности создания методики учета экологической составляющей в оценке потребительских свойств машины.

Известно, что основные компоненты экологического ущерба снегоходных машин проявляются в форме изменения физико-механических и теплофизических параметров снежного покрова в районе колеи движения машины [19], [21]. Изменение температуры в толще снежного покрова и мерзлого грунта может быть смоделировано в виде температурных полей [33].

Моделирование экологических последствий воздействия движителей на путевую поверхность позволит выявить критерии оценки этих последствий воздействия движителей на опорную заснеженную поверхность.

Теплофизические характеристики снежного покрова. Снежный покров представляет собой многокомпонентную дисперсную, капиллярно-пористую среду, состоящую в общем случае из твердых частиц (кристаллы льда), воды с растворенными в ней веществами и воздуха, содержащего пары воды [6], [24], [25], [31], [36]. Особая роль при изучении вопросов теплофизики снежного покрова принадлежит процессам тепло- и массопереноса. В снежном массиве имеют место все виды теплообмена – кондуктивный, конвективный и лучистый. Их количественное соотношение и значение могут меняться в зависимости от состояния снежного покрова и внешних воздействий [23].

При рассмотрении снежного покрова с такой точки зрения для описания процессов переноса тепла и вещества можно применить объединенную теорию тепло- и массопереноса в дисперсных капиллярно-пористых средах, предложенную А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым. Система дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + a_m \delta_\theta \varepsilon_r r \frac{c_m}{c_q} \nabla^2 t + a_m \varepsilon_r r \frac{c_m}{c_q} \nabla^2 \theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \delta_\theta \nabla^2 t + a_m \nabla^2 \theta, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \delta_\theta \nabla^2 t + a_m \nabla^2 \theta, \quad (2)$$

где t – температура; τ – время, θ – термодинамический потенциал массопереноса; δ_θ – термоградиентный коэффициент; a_q , a_m – коэффициенты температуропроводности и потенциалопроводности массопереноса; c_q , c_m – соответственно приведенная удельная теплоемкость и массоемкость капиллярно-пористого тела; ε_r – коэффициент фазового перехода водяного пара в лед (облимации); r – соответствующая удельная теплота фазового перехода;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \text{оператор Лапласа.} \quad (3)$$

Сложность решения приведенной системы по отношению к снежному покрову заключается в сложности определения его параметров и описания процессов, которыми сопровождаются перенос тепла и массы. Для упрощения в дальнейшем будем рассматривать процессы переноса тепла и вещества в снежном массиве в плоской постановке задачи, т.е. будем считать, что они происходят в плоскости, перпендикулярной колее транспортного средства. Свойства снежного покрова по длине колеи будем считать неизменными. Учитывая изложенное, выражения для градиентов температуры и термодинамического потенциала массопереноса запишутся следующим образом:

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial z} + \frac{\partial t}{\partial y}; \quad \nabla \theta = \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (4)$$

где z – вертикальная координата текущей точки снежного массива, y – горизонтальная координата.

В общем случае, связанное вещество состоит из неконденсирующего газа (сухого воздуха), водяного пара, воды и льда. Однако при рассмотрении тепло- и массопереноса в снежном покрове не представляется возможным определить содержание связанного вещества в твердой фазе, так как скелет снежного покрова сам является льдом, и невозможно зафиксировать изменение его объема и массы. Поэтому в дальнейшем массу скелета будем считать неизменной, а связанное вещество рассматривать состоящим из воздуха и водяного пара.

Учитывая изложенное, можно определить удельную массоемкость снежного покрова по отношению к парогазовой смеси (влажному воздуху)

$$c_m = \frac{\Pi b M^0}{\rho R}, \quad (5)$$

где Π – пористость тела (объем пор в единице объема тела); b – коэффициент заполнения капилляров: если считать, что снежный покров равномерно по всему объему заполнен влажным воздухом, то $b=1$; $M^0 = 29$ – молекулярный вес воздуха; $R = 8,31$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная; ρ – плотность тела.

Свойства снежного покрова сильно изменяются в зависимости от глубины залегания. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям, влажность воздуха, находящегося в порах и капиллярах снега, изменяется от величины, равной влажности атмосферного воздуха у поверхности, до максимального влагосодержания на границе с мерзлым грунтом. При небольшой глубине снежного покрова влажность воздуха в порах может быть с достаточной степенью точности определена по приближенной формуле

$$\varphi(z) = (1 - z)\varphi_0 + z, \quad (6)$$

где φ_0 – относительная влажность атмосферного воздуха; z – вертикальная координата текущей точки снежного покрова, в которой определяется влажность.

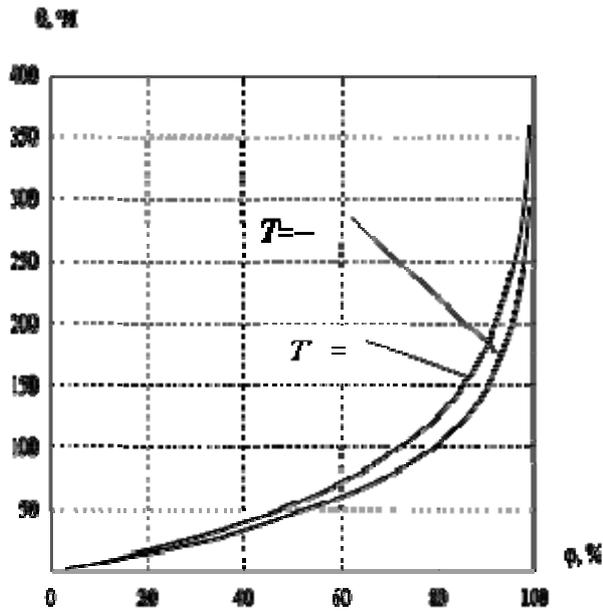


Рис. 1. Зависимость термодинамического потенциала массопереноса от относительной влажности воздуха

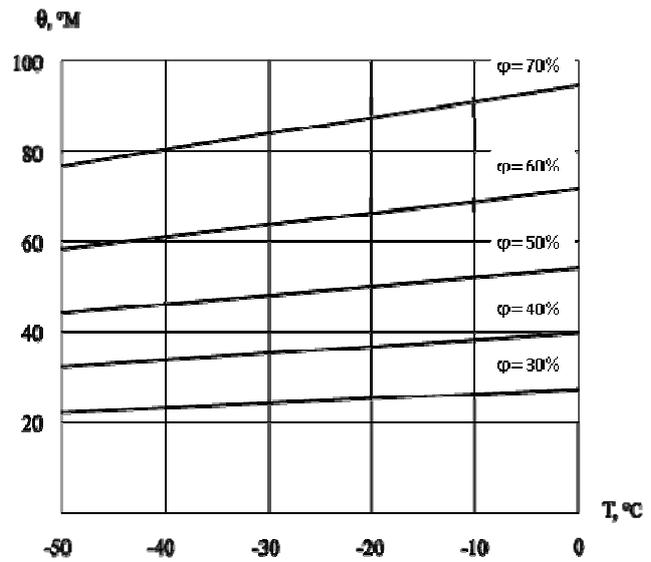


Рис. 2. Зависимость термодинамического потенциала массопереноса от температуры

При максимальном влагосодержании воздуха водяной пар находится в термодинамическом равновесии с жидкостью, т.е. при изменении внешних условий пар может переходить в жидкое состояние. Однако жидкая вода за достаточно короткий промежуток времени превращается в лед, поэтому можно считать, что водяной пар конденсируется непосредственно в лед. Такое упрощение справедливо также потому, что удельная теплота сублимации (облимации) льда равна сумме удельных теплот последовательных фазовых превращений водяного пара в жидкость и жидкости в лед.

При влагосодержании, равном нулю (сухой воздух), потенциал массопереноса равен 0°M .

Коэффициент температуропроводности снега a_q в основном определяется его плотностью и может быть приближенно определен из графика (рис. 3), построенного по результатам многолетних натуральных наблюдений [8]. Термоградиентный коэффициент δ_0 учитывает влияние термодинамической силы $\nabla\theta$ на процесс теплопереноса, т.е. равен отношению разности потенциалов массо- и теплопереноса при нулевой величине потока вещества. Величина этого коэффициента зависит от распределения температуры и массосодержания влажного воздуха в капиллярно-пористом теле. Для снежного покрова в зависимости от влажности воздуха этот коэффициент можно приближенно определить по графику, приведенному на рис. 4.

Удельная теплота r сублимации кристаллов льда зависит от температуры (табл. 1) Критерий фазового перехода ε_r для снежного покрова принимаем равным 1, так как рассматриваем связанное вещество в газообразном состоянии и фазовые превращения, минуя жидкую фазу.

Таблица 1
Зависимость удельной теплоты сублимации льда от температуры

T, °C	0	- 10	- 20	- 30	- 40
r, кДж/кг	2834,8	2837,0	2838,4	2839,0	2838,9

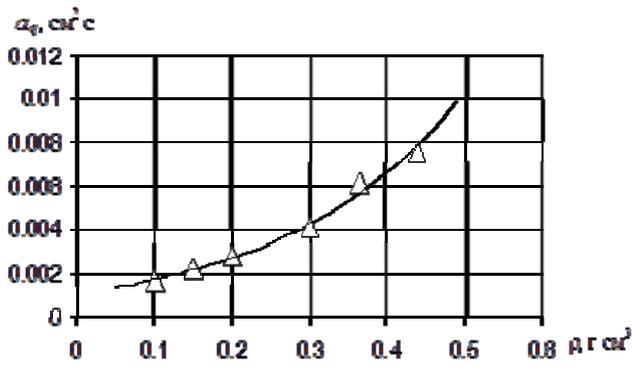


Рис. 3. График для определения коэффициента температуропроводности снега в зависимости от его плотности

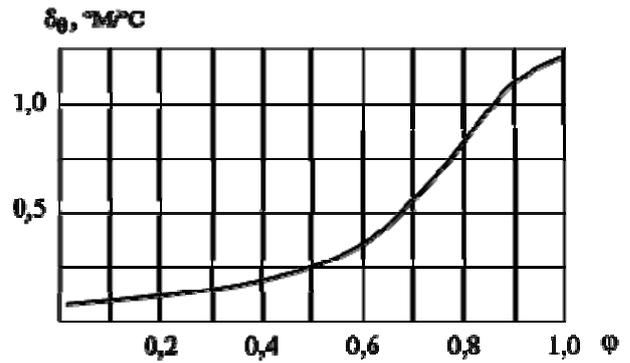


Рис. 4. Зависимость термоградиентного коэффициента от относительной влажности порового воздуха

Температурные поля в снежном покрове. Фактором, влияющим на выживаемость зимующих растений, является температура на глубине залегания их биологически активной массы. С этой точки зрения наибольший интерес представляет первое уравнение системы (2). Для решения дифференциального уравнения с частными производными необходимо задаться начальными и граничными условиями. В качестве начального принимается распределение температуры в снежном массиве в начальный момент времени после прохода движителя транспортного средства.

Принимаем распределение температуры в ненарушенном снежном покрове линейным, т.е. на поверхности равной температуре окружающего воздуха ТП, а на границе с мерзлым грунтом ТМГ в зависимости от естественной высоты снежного покрова предлагается определять с использованием графика (рис. 5), построенного по результатам многолетних натуральных наблюдений [10], [12], [33].

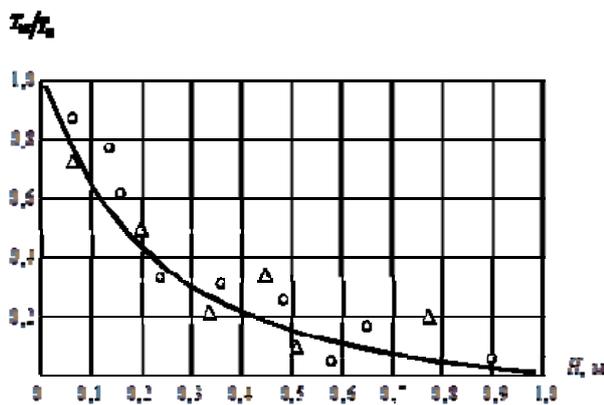


Рис. 5. График для определения температуры на границе снежного покрова и мерзлого грунта ТМГ в зависимости от глубины ненарушенного снега

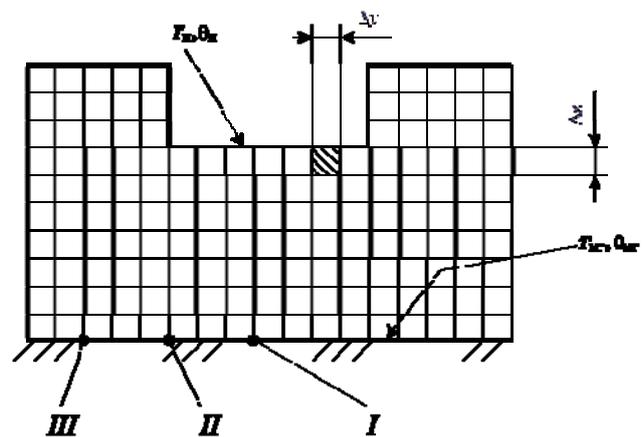


Рис. 6. Конечно-элементная схема поперечного сечения снежного покрова: I, II, III – расчетные точки, соответствующие середине колеи, ее боковой границе и границе зоны выдавленного снега

Данный график с достаточной степенью точности позволяет определить температуру снежного покрова на границе с грунтом при температуре окружающего воздуха ниже -10°C . Будем считать, что в начальный момент времени после деформации снежного покрова

движителем транспортного средства температура на границе раздела между снегом и мерзлым грунтом будет такой же, как в естественных условиях, т.е. определится по графику (рис. 5). Начальное распределение температуры в районе колеи также принимается линейным, изменяющимся от температуры воздуха на поверхности $T_{\text{П}}$ до значения $T_{\text{МГ}}$ на поверхности мерзлого грунта.

Таким образом, можно записать начальное условие для поставленной задачи, оно выразится как зависимость температуры снежного покрова от глубины залегания.

Граничным условием для поставленной задачи будет задание температуры поверхности снежного покрова, которую будем считать равной температуре окружающего воздуха, т.е. считать теплообмен между поверхностью снега и внешней средой идеальным.

Уравнение (2) решалось методом конечных разностей с использованием ЭВМ. Принятая сетка разбиения исследуемого объема снега на конечные элементы в ортогональной системе координат приведена на рис. 6. Конечный элемент представляет собой прямоугольник со сторонами, равными соответствующим шагам разбиения (т.е. $\Delta y; \Delta z$).

Температура в рассматриваемой точке определится как сумма текущего значения и приращения за промежуток времени Δt

$$t_{ij} = t + \Delta t = t(\tau)_{ij} + [\Delta t(\tau)]_{ij}. \quad (7)$$

Следовательно, решение поставленной задачи сводится к решению дифференциального уравнения с частными производными в функции трех переменных (2) по циклической расчетной схеме по выражению (7) последовательно для каждой из внутренних точек разбиения рассматриваемого расчетного поля (см. рис. 6). Циклическая схема реализована на ЭВМ в программе MatLab® 4.0.

Наиболее характерные результаты численного решения уравнения (2) приведены на рис. 7. Расчет производился для снежного покрова с начальной толщиной 0,3 м, средней плотностью 0,23 г/см³, при температуре окружающего воздуха – 20°С.

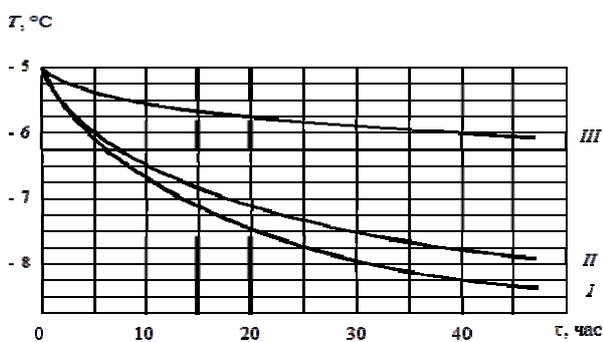


Рис. 7. Расчетные кривые изменения температуры на границе «снежный покров - мерзлый грунт» после деформации снега

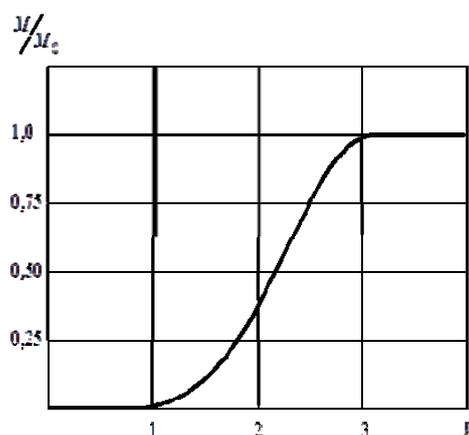


Рис. 8. Зависимость биоактивной массы растений от температурного коэффициента вымерзания

Как видно из рис. 7, температура под колесей понижается практически на 3,5°С за период в 48 ч, а затем стабилизируется. Для случая деформации снега плоским штампом результаты расчета в точках I и II практически совпадают. В расчетной точке III также наблюдается понижение температуры, хотя и менее интенсивное, это объясняется постепенным выравниванием свойств снежного покрова при удалении от колеи.

При деформации снежного покрова цилиндрическим штампом (роторно-винтовым движителем) при прочих равных условиях скорость понижения температуры в плоскости,

соответствующей границе колеи, отличается от скорости в ее середине (кривая II рис. 7). Это объясняется особенностями образования колеи роторно-винтового движителя, конфигурацией ядра уплотнения.

Аналитическое определение температурных полей в мерзлых грунтах при фазовых превращениях. После расчета температурного поля в снежном покрове, измененного в результате воздействия на него движителей снегоходной техники, можно определить температуру на границе раздела между снежным покровом и грунтом. Эта температура будет являться граничным условием при расчете температурных полей в мерзлом грунте и определении температуры на глубине зимовки биологически активной массы растений. Задача отыскания функции распределения температур для талой и мерзлой зон дисперсной среды сводится к следующему: необходимо рассмотреть два тела со сложной конфигурацией ограничивающих их поверхностей. Границей между этими телами является граница фазового перехода, температура на этой границе задается равной 0°C. Температура на поверхности рассматриваемого полупространства, как было отмечено, равна температуре нижней части снежного покрова.

Далее рассматривается промерзание полуограниченной дисперсной среды с учетом миграции влаги в талой зоне. Математически задача сформулирована и решена в работе Н.Н. Кожевникова [16]. Для оценки потерь биологической массы растений после влияния на них этой температуры необходимо сравнить ее с критической температурой для конкретного вида растения. Уменьшение биологической массы растений происходит главным образом из-за понижения температуры на глубине их зимовки ниже некоторого критического предела. При толщине снежного покрова естественного залегания такого, как правило, не происходит, однако при воздействии на снежный покров движителей снегоходных машин наблюдается местное изменение толщины и плотности снега и, следовательно, его теплофизических характеристик.

Полное вымерзание происходит при понижении минимальной температуры почвы на глубине залегания узлов кущения растений в течение 2..3 суток ниже критической [11], [12], [19].

Большинство растений средней полосы России, Сибири и Дальнего Востока имеют глубину залегания узлов кущения порядка 20..50 мм, на этой же глубине сосредоточено наибольшее количество биомассы их корней, поэтому оценки выживаемости растений в зимний период введен критерий, равный отношению критической температуры для данного вида растения к температуре на глубине зимовки - температурный коэффициент вымерзания растений, W

$$W = \frac{T_{\text{кр}}}{T}. \quad (8)$$

При значениях коэффициента W больше 3,0 (рис. 8) вымерзания растений не происходит. Исследования ряда ученых, И. М. Васильева, А.И. Слепченко и других, [8], [9] позволяют сделать вывод о том, что значительное вымерзание растений начинается при уменьшении коэффициента W ниже 2,5 и количество погибших растений резко увеличивается, достигая 100% при величине $W = 1,0$.

Таким образом, за допустимое воздействие транспортных средств на снежный покров целесообразно принять такое, при котором изменение температуры на глубине почвы равным 35 мм не приводило бы к уменьшению температурного коэффициента до значений ниже 2,5..2,4.

На основе экспериментальных исследований, проведенных Ю.И. Молевым и У.Ш. Вахидовым [9], [29] предложена формула для оценки потерь массы растений от изменения температурного режима на глубине зимовки

$$\frac{M}{M_0} = (1 - U)S = (1 - \sin[0,8W + 0,77])S, \quad (9)$$

где M_0 – биологическая масса растений, находившихся на исследуемых участках до начала зимовки; M – биологическая масса растений на исследуемом участке после зимовки; U – ко-

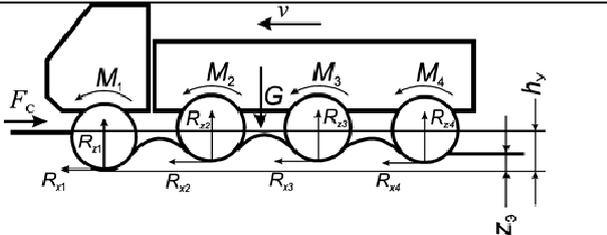
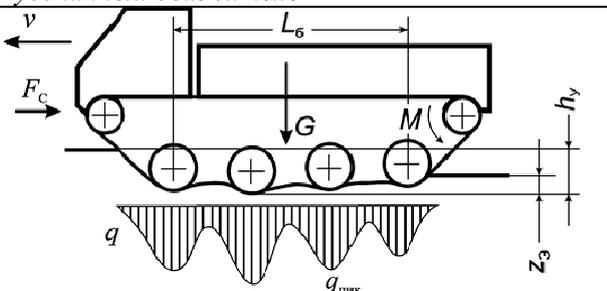
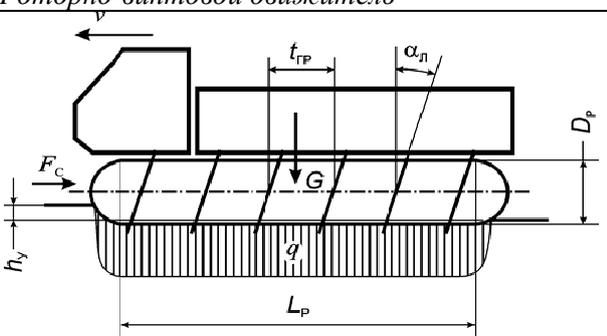
эффицент снижения урожайности; S – поверхность на глубине зимовки растений, на которой наблюдается изменение температуры.

Моделирование экологических последствий воздействия движителей снегоходных ТТМ на заснеженную поверхность пути

Параметры колеи транспортных средств в снежном покрове. На основе математических моделей взаимодействия движителей с заснеженным опорным основанием (табл. 2) выполнен расчет плотности снега при деформации плоскими и цилиндрическими штампами, [2], [4], [26], [27], [30], [32] (рис. 9 и рис. 10), что позволило провести качественный анализ параметров колеи с учетом не только сжатия снега и экскавационно-бульдозерных эффектов, но и с учетом бокового выдавливания снега в сторону от колеи. Эти же математические модели позволяют рассчитать изменение физико-механических свойств снежного покрова (плотности снега) в пределах колеи в зависимости от типа и характеристик транспортного средства.

Таблица 2

Математические модели взаимодействия движителей с заснеженным опорным основанием

Расчетные схемы взаимодействия движителя с деформируемым опорным основанием	Математическая модель, авторы, источник
<p><i>Колесный движитель</i></p> 	$h_y = \left[\frac{q}{\frac{b + 0,0287(H \cos \beta)^{3/2}}{H \left(\frac{0,3}{\rho_0 + 0,3} b + 0,0287(H \cos \beta)^{3/2} \right)}} \right] q + 0,735K_{ж}$ <p>Беляков В.В. [3]</p>
<p><i>Гусеничный движитель</i></p> 	$h_y = \left[\frac{q}{\frac{b + 0,0287H^{3/2}}{H \left(\frac{0,3}{\rho_0 + 0,3} b + 0,0287H^{3/2} \right)}} \right] q + 0,735K_{ж}$ <p>Барахтанов Л.В. [1], Беляков В.В. [3], Малыгин В.А. [26]</p>
<p><i>Роторно-винтовой движитель</i></p> 	$h_y = \left[\frac{5G_p}{1,41K_{ж} L_p \sqrt{D_p}} \right]^{2/5}$ <p>Куляшов А.П. [32], Колотилин В.Е. [17]</p>

На рис. 9 и рис. 10 показаны зависимости, отражающие результаты испытаний снежного покрова на сжатие штампами с различными параметрами. Как видно из рисунков, имеет место хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных в диапазоне давле-

ний от 0,01 до 0,07 МПа, что является областью давлений на опорную поверхность большинства транспортно-технологических машин.

Из рис. 9 следует, что средняя плотность снега, находящегося в зоне ядра уплотнения, повышается с ростом давления движителя на опорное основание. Рост плотности снега продолжается до определенного предела, после которого она практически не изменяется. Согласно полученным данным, этот предел составляет примерно $0,50 \text{ г/см}^3$ [10], [27], [30].

При уплотнении снега цилиндрическими штампами (рис. 10) происходит более быстрый рост плотности при небольших нагрузках, а затем плавное возрастание до $0,45..0,50 \text{ г/см}^3$ [24], [26] [29].

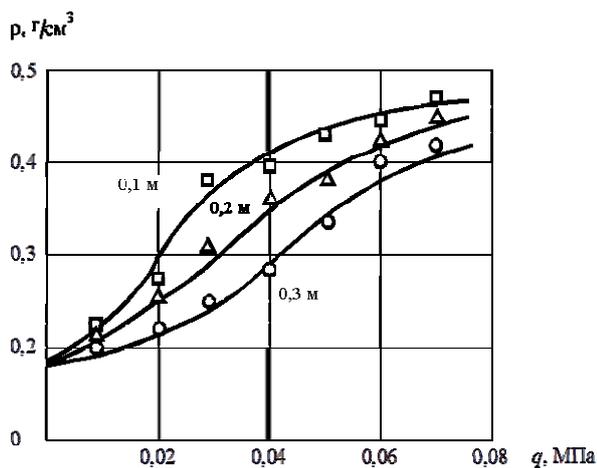


Рис. 9. Изменение средней плотности снега в зоне ядра уплотнения от давления плоского штампа при различной толщине снежного покрова

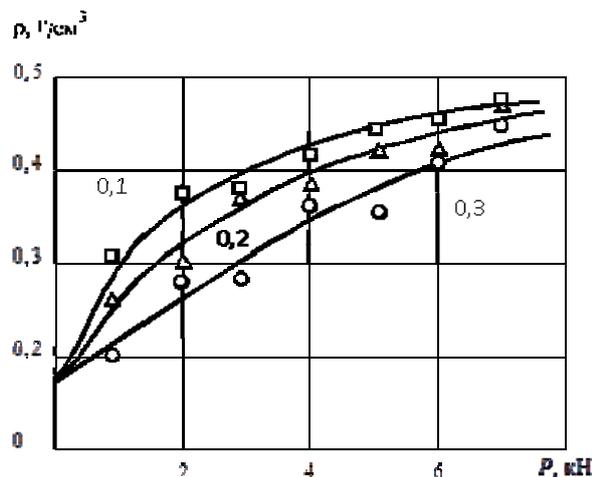


Рис. 10. Изменение плотности снега при деформации цилиндрическим штампом диаметром 0,44 м при различной начальной толщине снежного покрова

Результаты моделирования температурных полей в мерзлом грунте

Как уже было отмечено, жизнедеятельность растений в зимний период во многом зависит от температуры, на глубине залегания их корневых систем и узлов кущения. Проведенные теоретические исследования позволили получить математическую модель теплопереноса в системе «заснеженное опорное основание – мерзлый грунт» после деформации снежного покрова движителями транспортных средств [8], [18], [19]. Эта модель, в свою очередь, позволяет определить температуру на глубине зимовки растений в зависимости от типа и конструктивных параметров движителя [7], [9] - [11], [13], [15]. Целью расчетов является установление связей между уплотнением снежного покрова движителем снегоходной машины экологическими последствиями выраженными, например, снижением урожайности почвы, потерей биомассы растений.

Результаты расчетов температурных полей в мерзлом грунте после деформации снежного покрова различными штампами (движителями) сопоставляются с натурными наблюдениями за изменениями температурных полей [28].

На рис. 11 показано изменение во времени температуры на глубине зимовки после деформации снежного покрова плоским штампом, а на рис. 12 приведена зависимость относительной температуры (отношение температуры зимовки к температуре на поверхности снежного покрова) от удельной нагрузки в контакте движителя со снегом. Указанная зависимость получена путем теоретического расчета [28], на график нанесены экспериментальные точки, полученные в результате обработки натуральных замеров температур.

Экспериментальное определение снижения биомассы растений после зимовки сводилось к измерению массы скошенных растений (взвешиванию). Затем производилось сравне-

ние массы растений, скошенных на исследуемых делянках, находящихся в зоне колеи транспортного средства, существовавшей в снежном покрове, и в зоне, где в течение зимовки снежный покров не подвергался внешним воздействиям (т.е. не деформировался).

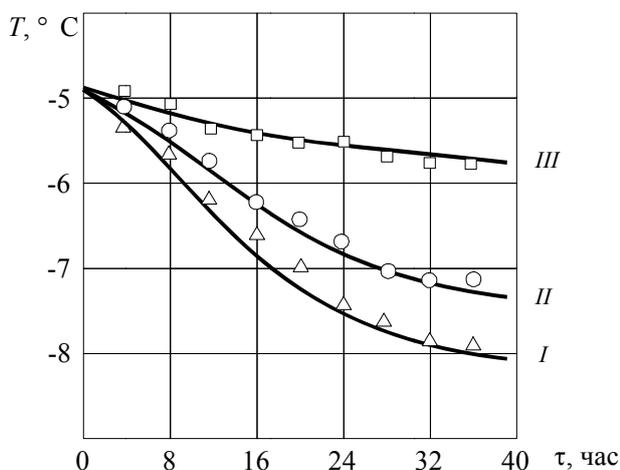


Рис. 11. Изменение температуры на глубине зимовки растений после деформации снежного покрова плоским штампом

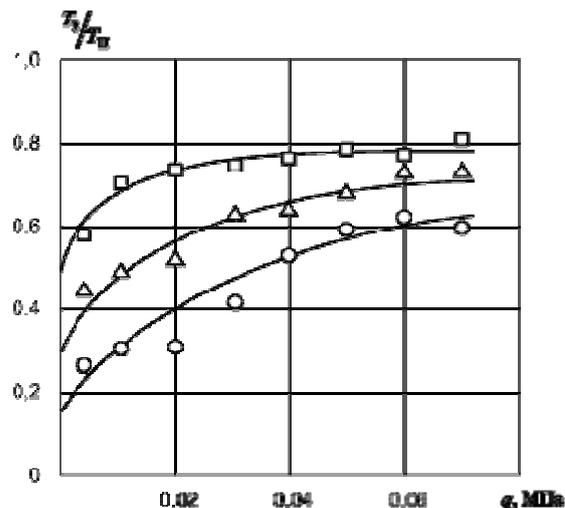


Рис. 12. Зависимость температуры на глубине зимовки растений от давления, оказанного движителем на снежный покров

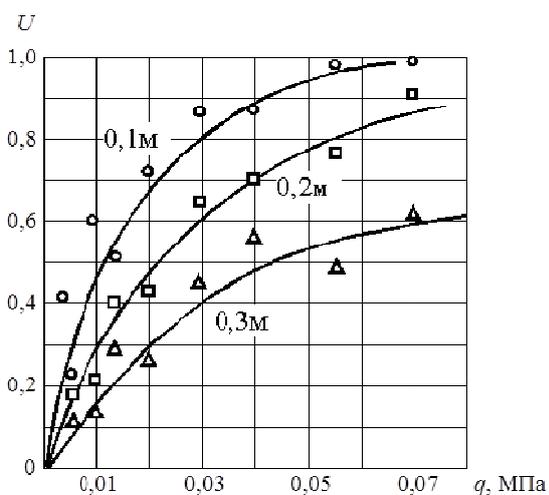


Рис. 13. Зависимость снижения урожайности клевера от давления при различной начальной толщине снега

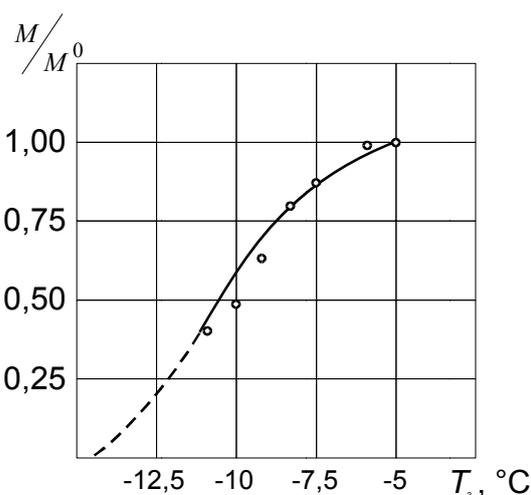


Рис. 14. Зависимость снижения биомассы клевера от температуры на глубине зимовки

На рис. 13 показаны кривые снижения урожайности клевера в зависимости от давления движителя на снежный покров разной начальной толщины (от 0,1 м до 0,3 м), а на рис. 14 приведен экспериментальный график изменения биомассы клевера в зависимости от температуры на глубине зимовки. Кривой линией на графике показана аппроксимация экспериментально полученных численных значений. Штриховой линией показана экстраполяция приведенной зависимости [28], [29].

Разработанные математические модели расчета температурных полей на глубине зимовки растений и проведенные экспериментальные исследования позволили оценить влияние различных типов движителей на температуру в зоне залегания узлов кущения и корневых систем растений в зависимости от комплекса факторов, влияющих на эту температуру (рис. 15).

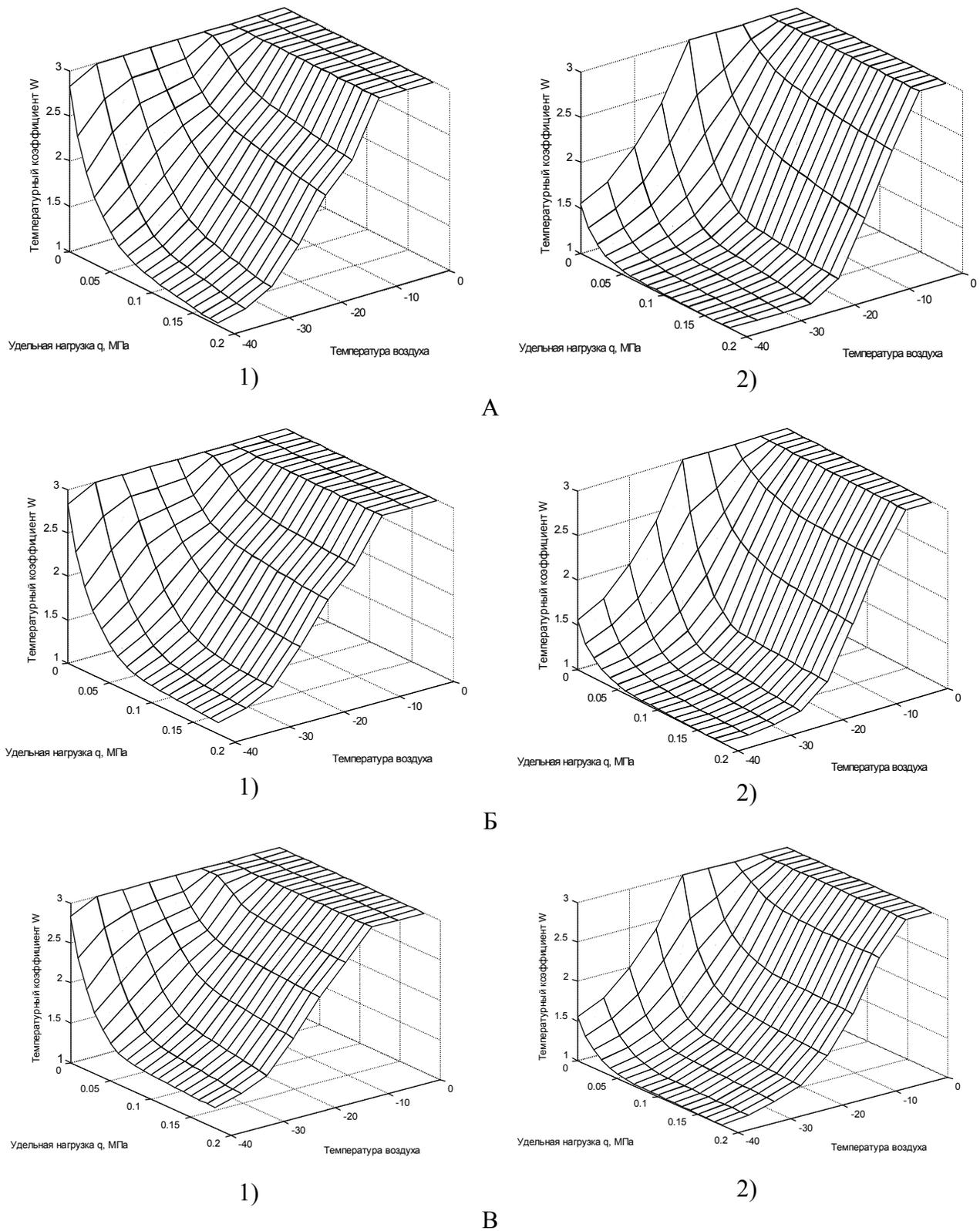


Рис. 15. Оценка влияния движителей транспортных средств на температурный критерий вымерзания клевера:

А – колесного; Б – гусеничного; при начальной высоте снега – 1 – 0,4 м; 2 – 0,2 м;

В – для роторно-винтового движителя

Из анализа приведенных зависимостей можно заключить, что при высоте снежного покрова 0,2 м и менее зимовка растений протекает в наименее благоприятных условиях, и воздействие на снежный покров движителей приводит к резкому понижению температуры.

Все движители оказывают примерно одинаковое влияние на температурный режим зимовки растений [28], что объясняется приблизительно одинаковыми свойствами снега в сформированных колеях различных движителей. Таким образом, при небольшой высоте снежного покрова влияние движителей снегоходной техники на температурный режим в зоне зимовки растений наиболее ощутимо.

При толщине снежного покрова 0,4 м и более наблюдаются отличия в установлении температурного режима мерзлого грунта при воздействии на снежный покров различных типов движителей. Эти отличия объясняются особенностями формирования колеи различных движителей. Наименее благоприятные условия зимовки растений формируются при движении по снегу колесных машин, что можно объяснить дискретной конструкцией движителя, т.е. несколькими циклами «уплотнения – перемещения» снега в колее за один проход [3], [4], [6], [24], [25].

Таким образом, в прогнозных оценках проектируемых ТТМ среди критериев эффективности и конкурентоспособности, описанных в работе [5], показатель экологической эффективности может быть рассчитан применительно к данному типу движителя, предполагаемым трассам движения и температурам окружающего воздуха в зимний период.

Выводы

Для предотвращения экологического и прямого экономического ущерба от деятельности наземного вездеходного транспорта целесообразно ввести дополнительные ограничения в показатели критериев эффективности и конкурентоспособности – показатель экологической эффективности, численные значения которого могут быть получены по предложенной авторами методике. Ущерб, наносимый вездеходной техникой, в определенных условиях без учета возможного вреда, причиняемого движителем, может быть настолько велик, что не учитывать его при оценке потребительских свойств ТТМ невозможно.

Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дисс. ... док. техн. наук. – Горький, 1988. – 342 с.
2. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
3. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 1991. – 307 с.
4. **Беляков, В.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / В. В. Беляков, Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов., В.С. Макаров // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 84.
5. **Беляков, В.В.** Критерии оценки качества транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, П.О. Береснев, М.Е. Бушуева, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин, З.А. Кострова, В.С. Макаров, А.В. Михеев, Д.М. Порубов, В.И. Филатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №4. – С. 144–184.
6. **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.
7. **Варданын, Р.С.** Процессы теплопереноса в снежном покрове / Р.С. Варданын, Т.В. Водопьянов, В.А. Жук, С.В. Доровских, Ю. И Молев, А.П. Куляшов, В.А. Шапкин // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники: сб. науч. трудов к 60-летию кафедры «Автомобили и тракторы». Н. Новгород, НГТУ, 1997. – С. 115–118.
8. **Васильев, И.М.** Как обеспечить благоприятную зимовку сельскохозяйственных растений / И.М. Васильев. – М.: Знание, 1957. – 215 с.
9. **Вахидов, У.Ш.** Анализ причин изменения урожайности растений в период таяния снежного покрова / У.Ш. Вахидов, С.В. Доровских, Б.В. Кузнецов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Разви-

- тие транспортно-технологических систем в современных условиях: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Н. Новгород, НГТУ, 1997. – С. 220–222.
10. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 24–26.
 11. **Вахидов, У.Ш.** Исследование теплофизических характеристик снежного покрова в колеях движителей транспортных средств (тезисы) / У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники // Сб. науч. трудов. НГТУ. – Н. Новгород, 1997. – С. 198–199.
 12. **Голубев, В.Н.** Особенности тепло- и массопереноса в стратифицированной снежной толще / В.Н. Голубев, Е.В. Гусева // Снежный покров в горах и лавины. – М.: Наука, 1987. – С. 62–74.
 13. **Доровских, С.В.** Влияние движителей на теплофизические характеристики снежного покрова / С.В. Доровских, В.А. Жук, И.Ю. Кораблев // Развитие транспортно-технологических систем в современных условиях: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Н. Новгород, НГТУ, 1997. – С. 132–136.
 14. **Доровских, С.В.** Экологические аспекты взаимодействия движителей с полотном пути / С.В. Доровских, А.П. Куляшов // Лесозэксплуатация: Межвузовский сб. науч. тр. Красноярск, СибГТУ, 1998. С. 172–175.
 15. **Ерасов, И.А.** Исследование теплофизических характеристик снежного покрова в колеях движителей транспортных средств / И.А. Ерасов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин, С.В. Доровских, У.Ш. Вахидов // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники: сб. науч. трудов. – Н. Новгород, НГТУ, 1997. – С. 198–199.
 16. **Кожевников, Н.Н.** Тепло-массоперенос в дисперсных средах при промерзании / Н.Н. Кожевников // Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1987. – 188 с.
 17. **Колотилин, В.Е.** Исследование процессов взаимодействия роторно-винтового движителя ледово-фрезерной машины со снежным покровом и динамических нагрузок в ее силовом приводе: дисс... канд. тех. наук: 05.05.04. – Киев, 1978. – 253 с.
 18. **Колотилин, В.Е.** Методы оценки экологической безопасности транспортно-технологических машин / В.Е. Колотилин // Проблемы транспортных и технологических комплексов: сб. научных статей III Международной научно-технической конференции (7-8 июня 2012 г.). – НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2012. – С. 37–41.
 19. **Колотилин, В.Е.** Теоретические исследования последствий движения роторно-винтовых машин по заснеженной местности / В.Е. Колотилин, В.А. Шапкин // Транспортно-технологические машины и комплексы: сб. Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – М. – Н. Новгород, 2008. – Т. 24. – С. 50–63.
 20. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 367 с.
 21. **Куляшов, А.П.** Оценка экологических последствий воздействия снегоходной техники на опорные основания / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Тез. докл. Республиканской научно-техн. конф. Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях. – Санкт-Петербург, СПбГТУ, 1995. – С. 57.
 22. **Куляшов, А.П.** Проблемы экологической адаптации транспортных средств / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Тез. докл. республиканской научно-техн. конф. Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях. – Санкт-Петербург, СПбГТУ, 1995. – С. 58.
 23. **Лыков, А.В.** Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
 24. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 155–160.
 25. **Макаров, В.С.,** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21–24.
 26. **Малыгин, В.А.** Исследование процесса деформации снега под воздействием гусеничного движителя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных ма-

- шин: дисс. ... канд. техн. наук. 05.05.03. Горький, 1970. – 250 с.
27. **Малыгин, В.А.** Процессы, протекающие в снеге при сжатии его штампом / В.А. Малыгин, С.В. Рукавишников // Снегоходные машины: сб. научных трудов. Горький 1969. – Вып. 9. – С. 88–96.
28. **Молев, Ю.И.** Прогнозирование экологических последствий воздействия снегоходной техники на окружающую среду: дисс. ... канд. тех. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 1995. – 204 с.
29. **Молев, Ю.И.** Влияние воздействия вездеходной техники на изменение экологической обстановки в весенне-осенний период / Ю.И. Молев, У.Ш. Вахидов // ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 98: материалы Междунар. науч.-технич. конф. – Воронеж, ВГАСА, 1998. – С. 133–134.
30. **Рогожин, В.П.,** Малыгин В.А. Определение ожидаемой глубины колеи гусеничных машин на слабых грунтах / В.П. Рогожин, В.А. Малыгин // Снегоходные машины: сб. научных тр. Горький, 1973. – Вып. 5. – С. 47–53.
31. СНЕГ. Справочник / под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
32. Снегоходные машины / Л.В. Баракханов, В.И. Ершов, А.П. Куляшов, С.В. Рукавишников. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во 1986. – 191 с.
33. Теплофизика промерзающих и протаивающих грунтов / под ред. Г.В. Порхаева. – М.: Наука, 1964. – 186 с.
34. **Лотош, В.Е.** Фундаментальные основы природопользования. Кн. 2: Экология природопользования / В. Е. Лотош ; Урал. гос.ун-т путей сообщения. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 554 с.
35. **Лотош, В.Е.** Фундаментальные основы природопользования. Кн. 4: Экономика природопользования / В. Е. Лотош; Урал. гос.ун-т путей сообщения. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 449 с.
36. **Шапкин, В.А.** Влияние движительных систем на экологию опорных оснований / В.А. Шапкин, О.А. Чечулина, С.В. Доровских, В.А. Жук // ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 98: материалы междунар. науч.-технич. конф. Воронеж, ВГАСА, 1998. С. 128–30.

*Дата поступления
в редакцию 09.03.2017*

**V.V. Belyakov, U.S. Vahidov, V.E. Kolotilin, J.I. Molev, V.A. Shapkin,
D.V. Zezyulin, V.S. Makarov**

ASSESSMENT OF CONSUMER PROPERTIES OF TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL VEHICLES FOR SNOW-COVERED TERRAIN

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

The processes of the impact of propulsion systems all-terrain vehicles on the snow-covered soil surface, leading to a change of temperature fields at a depth of wintering plants, their partial winterkill and lower yields are considered. It is proposed to use as one of the criteria for assessing the consumer properties of snowmobile machines relative reduction of vegetation productivity soil surface.

Key words: transportation and technological vehicles, snow cover, snow-covered off road, mover, temperature fields, ecological of transportation and technological vehicles, depth of frost, biomass of plant.