

15. W i l c o x D. C. Turbulence Modelling for CFD. Dew Industries. Inc.La-Canada, California, 1998.
16. M e n t o r F. R. Two-equation Eddy viscosity Turbulence Models for Engineering Application. AIAA Journal, 32(8). – 1994. – P. 1598–1605.

Статья поступила в редакцию 27.06.2006

Алексей Викторович Веретельник родился в 1979 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Аспирант кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные источники энергии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ.

A.V. Veretelnik (b. 1979) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Gas-turbine and Non-traditional Energy Sources” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications.

---

УДК 625.032.32

В. В. Б е л я к о в, Ю. И. М о л е в

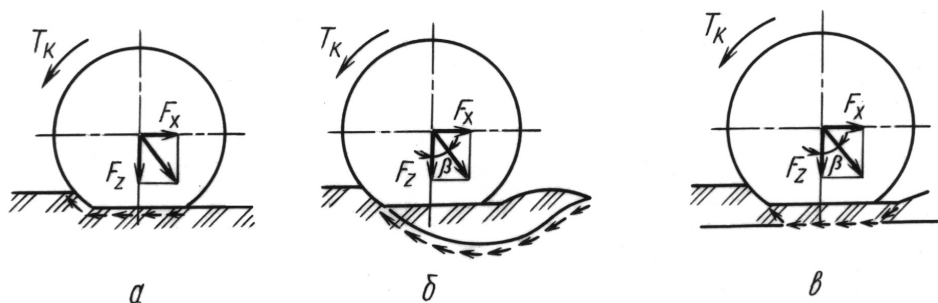
### **ВЛИЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ЭКСКАВАЦИОННОЙ ОСАДКИ ДВИЖИТЕЛЯ**

*Рассмотрен один из аспектов взаимодействия колеса с полотном пути, а именно влияние близлежащего недеформируемого слоя на глубину погружения колесного движителя в разрушаемый снежный покров. Полученные зависимости позволяют более точно рассчитать такие параметры взаимодействия колеса с дорогой, как сила тяги или сила сопротивления движению, а также получить зависимости изменения свойств снега, лежащего на дороге.*

Объем снега, подвергнувшегося экскавационному разрушению, принято находить из следующего уравнения [1]:

$$h_3 = \frac{V_{гр} G_{сц} \delta}{p_{шин} B_{кол}} = 1000 \frac{V_{гр} (\delta_1 + \delta_2)}{p_{шин} B_{кол}}, \quad (1)$$

где  $V_{гр}$  — объем грунтозацепов колес транспортных средств, равный произведению высоты рисунка протектора на коэффициент насыщенности рисунка протектора;  $G_{сц}$  — вес транспортного средства, приходящийся на одно колесо;  $\delta$  — коэффициент буксования с индексом 1 соответствует буксованию ведущих, а с индексом 2 — ведомых колес;  $p_{шин}$  — давление воздуха в шинах,  $B_{кол}$  — ширина рассматриваемого колеса. Однако при исследовании процессов образования и изменения снежного покрова на поверхностях дорог было установлено, что расчетные величины экскавационно разрушенного снега, остающегося на проезжей части, получаются меньшими в 2–3 раза, чем это происходит



**Рис. 1.** Схемы, иллюстрирующие ограничения движения колеса по сцеплению для поверхности скольжения, совпадающей с поверхностью контакта колеса с дорожным покрытием [2] (*а*); проходящей внутри массива опорного основания [2] (*б*); совпадающей с поверхностью контакта слоя снега с подстилающим дорожным покрытием (*в*)

в реальных условиях. Такое несоответствие можно объяснить тем, что при взаимодействии колеса с заснеженной поверхностью дорог поверхности скольжения и раздела “колесо–снег” не всегда совпадают. Различия в указанных подходах показаны на рис. 1 [2].

По первой схеме (см. рис. 1, *а*), для которой рассчитано уравнение (1), проскальзывание колеса происходит по поверхности контакта со снегом, а по второй схеме (см. рис. 1, *б*) — по поверхности, обеспечивающей минимум затрат энергии на деформацию. Для рассматриваемых условий необходимо добавить третью схему, приведенную на рис. 1, *в*, которая бы учитывала наличие близлежащего недеформируемого подстилающего слоя. При таком случае взаимодействия величина слоя экскавационно разрушенного снега будет больше, чем рассчитанная по уравнению (1), на величину

$$\Delta h_3 = h_7 \rho_7 / \rho_3, \quad (2)$$

где индексы 3 соответствуют параметрам экскавационно разрушенного снега, а 7 — уплотненного.

Из анализа результатов предыдущих исследований [3, 4] выявили, что до тех пор, пока значения напряжений в снежном накате превышают величину давления в зоне разгрузки колеса, рассматриваемый слой снега можно представить как единое тело, вертикальные, горизонтальные и касательные напряжения в разных точках которого равны между собой. В указанных условиях рассматриваемого взаимодействия перемещения одних объектов могут иметь место либо по поверхности “колесо–снег”, либо по поверхности “снег–опорное основание” (см. рис. 1, *а*, *в*). При этом действительная поверхность, по которой будет осуществляться скольжение, определится из условия минимизации энергозатрат. Если сила тяги, реализуемая колесом на

поверхности контакта,

$$F_T = \int_S (\tau_1 + c_1 + p_1 \varphi) ds \quad (3)$$

будет меньше, чем сила сдвига поверхности снега

$$F_{сдв} = \int_S (\tau_2 + c_2 + p_2 \operatorname{tg} \chi) ds, \quad (4)$$

то скольжение будет проходить по схеме, показанной на рис. 1, а, и уравнение (1) будет справедливым. Если же сила, необходимая для сдвига снега, будет меньше, то в выражение (1) необходимо ввести уточняющий параметр, рассчитанный по выражению (2). Таким образом, для разработки математической модели снежного покрова на поверхности дорог необходимо выяснить, при какой толщине уплотненного снежного покрова возможен его отрыв от подстилающей поверхности.

Для решения данной задачи в уравнения (3) и (4) необходимо ввести ряд упрощений. Во-первых, скорость деформации снежного покрова намного превышает скорость кристаллизации (т.е. будем рассматривать участки дорог с частотой воздействия движителей, большей чем один раз в 20...30 мин, и температурой поверхности дороги ниже чем  $-2 \dots -3^\circ\text{C}$ ), в связи с чем величиной адгезии снега к колесу и опорному основанию будем пренебрегать ( $c_1 = c_2 = 0$ ). Во-вторых, считаем, что давление движителя на снег равномерно как по ширине, так и по длине контакта, величины давлений со стороны снега на опорное основание равны давлению колеса на противоположную поверхность и также равномерно распределены по ширине и по длине контакта. Масса снега, заключенного в рассматриваемом объеме, составляет не более 0,5 кг, т.е. менее 0,25 % от величины действующей нагрузки со стороны колеса на поверхность дороги, в дальнейших расчетах данный параметр принимать во внимание не будем.

С учетом изложенного, условие сдвига дополнительного объема снега примет вид

$$B_{\text{кол}} p_{\text{шин}} \varphi \geq B_{\text{кол}} p_{\text{шин}} \operatorname{tg} \chi + h_7 p_{\text{отрыва}}, \quad (5)$$

где  $\chi$  — угол трения уплотненного снега по опорной поверхности;  $p_{\text{отрыва}}$  — давление, необходимое для отрыва рассматриваемого объема снега по вертикальной плоскости. Таким образом, условие разрушения снежного наката под действием колеса примет вид

$$h_7 \leq B_{\text{кол}} \frac{p_{\text{шин}}}{p_{\text{отрыва}}} (\varphi - \operatorname{tg} \chi). \quad (6)$$

Исследования снежного покрова на разрушение растяжением до настоящего времени не проводились. При этом рядом исследователей,

таких как И.П. Бутягин, К.Н. Коржавин [5] было установлено, что предел прочности льда на растяжение составляет 0,15... 0,3 МПа. Считая, что кристаллические связи скелета снега и льда имеют одну и ту же прочность (так как природа их одинакова), учитывая, что количество таких связей на единицу площади сечения у снега плотностью 600... 650 кг/м<sup>3</sup> меньше, чем у льда, на величину, равную 0,6... 0,7, а также что ширина пятна контакта у легковых автомобилей колеблется в пределах от 0,15 до 0,3 м, уравнение (6) можно записать в виде

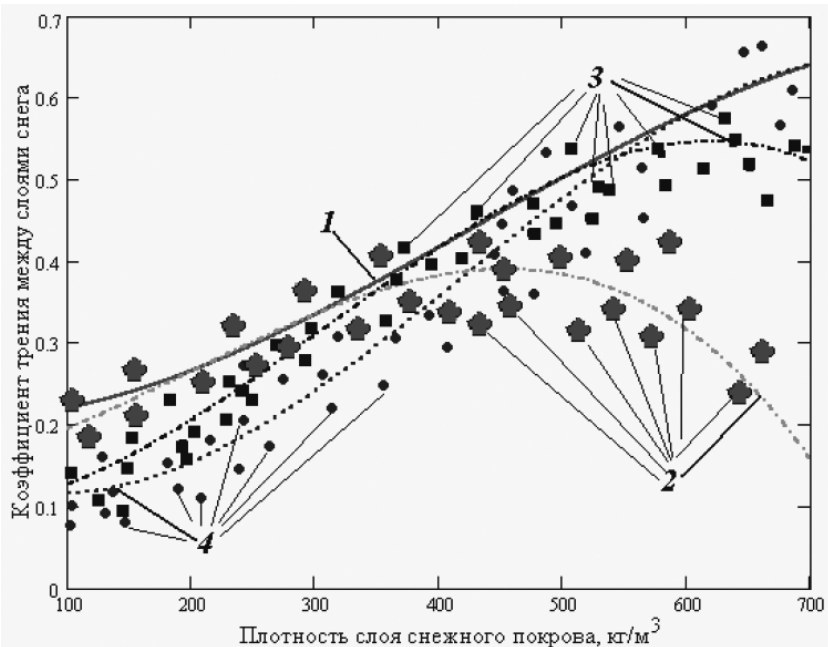
$$h_7 \leq (0,05 \dots 0,15)(\varphi - \operatorname{tg} \chi). \quad (7)$$

Принимая коэффициент сцепления колеса с уплотненным снегом равным 0,2... 0,3 [6], получаем, что при движении по асфальту, покрытому свежеснегившим или экскавационно разрушенным слоем снега, проскальзывание всегда будет осуществляться по поверхности “колесо–снег”, так как коэффициент трения снега по асфальту составляет 0,4... 0,5 [4].

До настоящего времени влияние слоистости снежного покрова на его деформационные свойства рассматривалось крайне редко [4, 5] и, главным образом, с точки зрения вертикальной деформации; изучение зависимостей величин сил сцепления между слоями снега с различной плотностью до настоящего времени проводилось лишь в рамках исследования поведения снежных лавин, т.е. для снежного покрова естественного залегания. Поэтому на кафедре СДМ НГТУ в 2003–2005 гг. были проведены исследования данной проблемы (рис. 2). Был разработан лабораторный стенд, представляющий собой короб, заполняемый до краев снегом заданной плотности. Сверху на него укладывался второй слой снега, плотность которого отличалась от плотности первого массива снега на заданную величину. Изменяя угол наклона поверхности раздела слоев снега к горизонту, определяли угол, при котором второй слой снега начинал двигаться относительно первого. Тангенс полученного угла наклона и является искомой функцией — коэффициентом трения между слоями снега различной плотности. Методом наименьших квадратов искомое выражение было приведено к виду

$$\begin{aligned} \varphi_i = & 0,209 - 0,089 \frac{\rho_i}{1000} + 2,215 \left( \frac{\rho_i}{1000} \right)^2 - 1,726 \left( \frac{\rho_i}{1000} \right)^3 + \\ & + 0,15 \left( \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{1000} \right) - 1,8 \left( \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{1000} \right)^2 + 2,1 \left( \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{1000} \right)^3. \quad (8) \end{aligned}$$

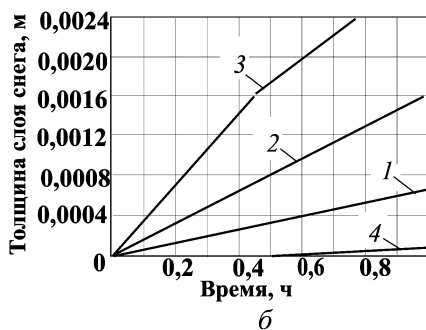
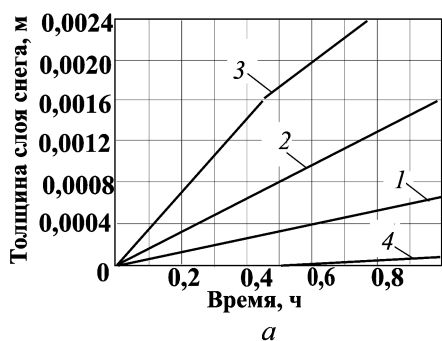
Полученные результаты свидетельствуют о том, что рост слоя экскавационно разрушенного снега не является монотонным. При достижении высоты  $h_7$  значения, полученного по выражению (7), происходит уплотнение снега, не затронутого экскавационными процессами.



**Рис. 2.** Экспериментальные и теоретические зависимости изменения коэффициента трения между слоями снежного покрова:

1 — теоретическая зависимость для однородного снежного покрова; 2 — теоретическая зависимость и экспериментальные значения для подстилающего слоя снега, плотностью  $300 \text{ кг/м}^3$ ; 3 и 4 — теоретические зависимости и экспериментальные значения для подстилающего слоя снега, плотностью  $500$  и  $650 \text{ кг/м}^3$  соответственно

Расчеты показывают, что максимальная высота экскавационно разрушенного снега, лежащего на асфальте, составит: во дворах (скорость движения автомобилей  $20 \text{ км/ч}$  или  $5,5 \text{ м/с}$ ) —  $0,15 \text{ мм}$ , на узких городских дорогах (скорость движения  $40 \text{ км/ч}$  или  $10,1 \text{ м/с}$ ) —  $0,5 \text{ мм}$ , для магистральных улиц (скорость движения  $60 \text{ км/ч}$  или  $16,7 \text{ м/с}$ ) —  $1,6 \text{ мм}$ , для загородных дорог (скорость движения  $90 \text{ км/ч}$  или  $25 \text{ м/с}$ ) —  $4,7 \text{ мм}$ , а для автомагистралей (скорость движения  $120 \text{ км/ч}$  или  $33,3 \text{ м/с}$ ) — до  $10 \text{ мм}$ . В случае, если снегопад продолжается, а снег с дороги не убирается, на дорогах будет образовываться снежный накат. Как видно из полученных выражений, в первую очередь он будет образовываться в местах локального снижения скорости транспортных потоков (в местах, где колеса автомобилей двигаются с минимальным буксованием), таких как перекрестки, автобусные остановки, дворы и прилегающие территории. После образования на дороге снежного наката, автомобили начинают двигаться с большей величиной буксования, что позволит увеличить толщину экскавационно разрушенного снега до следующих величин: во дворах и прилегающих территориях до  $4 \text{ мм}$ , на узких городских дорогах до  $5 \text{ мм}$ , на магистральных городских дорогах до  $7 \text{ мм}$ , а на загородных дорогах до  $12 \text{ мм}$ . Затем наступает процесс шлифования поверхности уплотненного снега



**Рис. 3. Изменение толщин уплотненного и экскавационно разрушенного снега в зависимости от времени действия снегопада и его интенсивности:**

*а* — при скорости 60 км/ч; *б* — при скорости 90 км/ч; 1, 2, 3 — изменение толщины экскавационно разрушенного снега при интенсивности снегопада 1 мм/ч, 5 мм/ч, 20 мм/ч соответственно; 4 — изменение толщины уплотненного снега при интенсивности снегопада 20 мм/ч (сильный снегопад)

как колесами транспортных средств, так и частичками экскавационно разрушенного снега. Кроме того, в случае перехода температуры поверхности дороги через  $0^{\circ}\text{C}$  происходит замерзание жидкой воды на поверхности дороги. Все эти факторы приводят к превращению снежного наката в снежно-ледовое образование, которое имеет крайне низкий коэффициент сцепления как с колесами транспортных средств, так и с другими фракциями снежного покрова. В результате, буксование колес при движении по указанной среде еще возрастает, что приводит к возможности увеличения высоты экскавационно разрушенного снега во дворах до 7 мм, на узких городских дорогах до 9 мм, а на магистральных городских дорогах до 13 мм. При использовании противогололедных реагентов как в чистом виде, так и в виде песчано-соляной смеси, получаемая поверхность движения будет обладать промежуточными сцепными свойствами (лучшими, чем у уплотненного снега и худшими, чем у асфальта). Поэтому максимально возможная толщина экскавационно разрушенного снега над поверхностью, обработанной противогололедными реагентами на узких городских улицах составит 3,5 мм, на магистральных городских улицах — 5... 7 мм, а на загородных дорогах — 7... 10 мм. Выведенные зависимости позволяют получить изменение толщины уплотненного и экскавационно разрушенного снега в зависимости от типа дороги, времени и интенсивности снегопада. В общем виде процесс увеличения толщины экскавационно разрушенного снега от времени и интенсивности снегопада показан на рис. 3. Точки перегиба на графиках соответствуют переходу подстилающей поверхности из одного состояния в другое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения / Под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: Изд-во ТАЛАМ, 2004. – 960 с.
2. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 227 с.
3. Проходимость автомобиля: Учеб. пособие / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
4. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов и др. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
5. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 283 с.
6. Суворов Ю. Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действия водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности дорожного движения, на участках ДТП: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Экзамен, 2003.

Статья поступила в редакцию 29.11.2005

Владимир Викторович Беляков родился в 1955 г., окончил Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова в 1977 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Автомобили и тракторы” Нижегородского технического университета, заместитель проректора по научной работе Нижегородского технического университета. Автор более 160 научных работ в области автомобиле- и тракторостроения.



V.V. Belyakov (b. 1955) graduated from the Gorkiy Polytechnic Institute n.a. A.A. Zhdanov in 1977. D. Sc. (Eng.), professor of “Automobiles and Tractors” department of the Nizhni Novgorod Technical University, deputy vice-rector on scientific work of the Nizhniy Novgorod Technical University. Author of more than 160 publications in the field of automobile and tractor engineering.

Юрий Игоревич Молев родился в 1967 г., окончил Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова в 1989 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Строительные и дорожные машины” Нижегородского технического университета. Автор более 100 научных работ, включая три монографии и три учебных пособия, в области автомобиле- и тракторостроения.



Yu.I. Molev (b. 1967) graduated from the Gorkiy Polytechnic Institute n.a. A.A. Zhdanov in 1989. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Construction and Road Vehicles” department of the Nizhni Novgorod Technical University. Author of more than 100 publications including 3 monographs, 3 textbooks, 2 inventions in the field of automobile and tractor engineering.