

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS423 (<https://doi.org/10.15862/04SATS423>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Расчетное обоснование распределения снеговой нагрузки на снегоудерживающие сооружения в системе лавинозащиты

Исаков А.Л., Ковалев Н.Ю.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ковалев Никита Юрьевич, e-mail: Kovalev.unoff@mail.ru

Аннотация. Оценка величины снеговой нагрузки является одной из важнейших задач при проектировании снегоудерживающих сооружений для защиты от схода лавин железных и автомобильных дорогах в горных районах. Ситуация осложняется тем, что лавины подразделяются, в зависимости от консистенции снега, на сухие, влажные и мокрые. В данной работе выполнен анализ существующих зарубежных и отечественных методов расчёта снеговой нагрузки, на основании которого был сделан вывод, об отсутствии зависимости величины нагрузки от распределения физико-механических параметров снегового покрова, во всех рассмотренных способах расчета. Более того, ни один из этих способов не дает возможности оценить распределение давления снега на снегоудерживающее сооружение по его высоте. В статье предложен альтернативный способ нахождения давления снежного пласта при помощи разработанной дискретной модели расчета распределения статического давления снега на преграду по ее высоте. Особенностью дискретной модели является

учет изменения физико-механических характеристик снега — плотности, удельного сцепления и угла внутреннего трения, по слоям природного отложения. Была выполнена верификация дискретной модели путем сравнения расчётных и экспериментальных данных, полученных в результате проведения как натурных, так и лабораторных экспериментов. Эксперименты проводились в лабораторных условиях на специальной модели, с использованием материала со стабильными физико-механическими характеристиками, не меняющимися в ходе выполнения эксперимента. Также для верификации были использованы результаты натурных экспериментов по определению давления снега естественного отложения на преграду, взятые из открытой печати.

Ключевые слова: лавина; сухой снег; параметры снежного покрова; давление снежного покрова; статическое давление снега; снегоудерживающее сооружение; оценка устойчивости снежного покрова

Justifying calculations of snow load distribution on snow retaining structures in avalanche protection system

Alexander L. Isakov, Nikita Yu. Kovalev

Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: Nikita Yu. Kovalev, e-mail: Kovalev.unoff@mail.ru

Abstract. Snow load estimation is one of the most important tasks in designing snow-retaining structures for avalanche protection of railways and motorways in mountainous areas. The situation is complicated by the fact that avalanches are subdivided, depending on the consistency of snow, into dry, wet and damp avalanches. This paper analyses the existing foreign and domestic snow load calculation methods, based on which was concluded that there is no dependence of the load value on the physical and mechanical parameters distribution of the snow cover in all the considered methods of calculation. Moreover, none of these methods makes it possible to estimate the snow pressure distribution on a snow-retaining structure by its depth. The article proposes an alternative way of calculating the snow layer pressure using the developed discrete model for calculating the static snow pressure distribution on a barrier by its depth. The discrete model peculiarity is to take into account the

change of physical and mechanical characteristics of snow — density, specific adhesion and angle of internal friction, by layers of natural deposit. Discrete model verification was performed by comparing the calculated and experimental data obtained as a result of both natural and laboratory experiments. The experiments were conducted in laboratory conditions on a special model, using a material with stable physical and mechanical characteristics that do not change during the course of the experiment. Also, for verification, the field experiment results on determining the naturally deposited snow pressure on an obstacle, taken from the open press, were used.

Keywords: avalanche; dry snow; snow cover parameters; snow cover pressure; static snow pressure; snow retaining structure; snow cover stability assessment

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Снежная лавина — природное явление, для возникновения которого существуют как необходимые, так и достаточные условия. Необходимым условием является наличие склонов земной поверхности с углами наклона к горизонту от 25 градусов до 55 градусов, а также присутствие на этих склонах снежного покрова. Достаточным условием — значение коэффициента устойчивости снега на склоне меньше единицы. Под коэффициентом устойчивости следует понимать отношение сил, удерживающих снег на склоне к сдвигающим силам.

Лавиноопасная территория — это горная местность, на которой существует потенциальная опасность схода лавин, приводящих или способных привести к угрозе жизни и здоровью людей, ущербу объектам экономики и окружающей природной среде. Практика эксплуатации железных дорог в условиях горной местности показывает, что, как правило, сходы снежных лавин на путь имеют периодически повторяющийся характер и приводят к необходимости закрытия перегонов на время расчистки пути от снега. Наряду с этим, непрогнозируемый выход лавины на дорогу нарушает условия безопасности движения поездов [1–8].

Проблема защиты от снежных лавин тесно связана с причинами их схода и расчетами их движения. Лавины являются сложной динамической материальной системой с многосторонними причинно-следственными связями между многочисленными параметрами, которые влияют на их возникновение и движение. Как было отмечено выше, на лавинный режим влияют: состояние снега, его физико-механические свойства, погодные и климатические условия, морфология склонов, наличие растительности на склоне. Все эти элементы связаны между собой, и их совокупность определяет основные параметры лавин. Классификация лавин играет важную роль в выработке решений по планированию и осуществлению защитных мероприятий [5; 9]. Существует множество способов описания и классификации лавин. Согласно международной морфологической классификации, лавины можно разделить в зависимости от типа начала движения и влажности снежного покрова.

По типу начала движения лавины подразделяются: на лавины от линии и лавины из точки. Лавины от линии возникают, когда на плотный слой снега (доску), лежащего на рыхлой снежной массе, оказывается дополнительная нагрузка. Лавины из точки начинаются с обрушения небольшого количества снега, захватывающего при движении по склону всё большее количество снега, кратно увеличивая свою скорость.

Вне зависимости от типа начала движения, лавины также подразделяются на сухие и мокрые. Лавины из мокрого снега возникают преимущественно в периоды оттепелей, когда между слоями снега различной плотности возникают водяные прослойки. Такие лавины движутся с малой скоростью, но из-за высокой плотности мокрого снега обладают большой разрушительной силой. Высокая плотность мокрого снега обуславливает быстрое «схватывание» снежной массы после остановки, что затрудняет разбор завалов.

Лавины из сухого снега как правило возникают из-за низкого сцепления между недавно выпавшей снежной массой и нижележащей ледяной коркой. Обладая высокой скоростью и низкой плотностью, лавины данного типа сопровождаются высокой снеговоздушной волной, величина давления от удара которой может достигать 800 кг/м^3 . Лавины из свежевypавшего снега обладают наибольшей регулярностью и чаще остальных выходят на путь, в связи с чем наносят наибольший ущерб железнодорожной инфраструктуре.

Борьба с лавинами подразделяется на два основных класса: профилактические мероприятия и инженерно-технические.

К профилактическим мероприятиям относятся мероприятия, целью которых является ликвидация лавинной опасности путём заблаговременного искусственного обрушения лавин. Такие мероприятия применяются в основном как временные способы борьбы с лавинами до момента окончания постройки капитальных инженерных сооружений.

К инженерно-техническим относят защитные сооружения различного назначения, от препятствующих начальной подвижке снега по склону, до изменяющих движение лавин или ограждающих защищаемый объект.

Самым эффективным способом борьбы с последствиями схода снежных лавин является предотвращение их схода. Одним из ключевых методов предотвращения схода лавин является создание системы снегоудерживающих сооружений на лавиноопасном склоне [10].

Снегоудерживающие сооружения — это комплекс специальных конструкций, барьеров (рис. 1), располагающихся в зонах зарождения лавин [11] и выполняющих следующие функции:

- обеспечение подпора снежного покрова извне, уменьшая тем самым внутренние напряжения в нем;
- создание прерывистости снежного покрова, ограничивая распространение линии отрыва, и таким образом уменьшение окончательного размера лавины;

- остановка мелких лавин, прежде чем они наберут достаточно высокую скорость и вызовут серьезные повреждения.

Классификация снегоудерживающих сооружений возможна по двум признакам: по видам крепления и по видам заполнения пролета между стойками.

Все виды крепления конструкций на склоне делятся на три типа:

- фундаментные, такой тип крепления используется на склонах с любыми углами наклона склона к горизонту, в размягчаемых, средне и сильновыветрелых скальных грунтах;
- подвесные, используются на склонах с углами наклона к горизонту более 30 градусов, при сопротивлении грунта под опорной частью стойки не менее 200 кПа;
- с анкерным креплением, используются на склонах с углами наклона к горизонту более 25 градусов в не размягчаемых, слабовыветрелых скальных грунтах.



Рисунок 1. Застройка склона снегоудерживающими сооружениями (<https://pxhere.com/en/photo/1127905> Дата обращения 19.10.2023)

Figure 1. Snow retention structures construction on the slope (<https://pxhere.com/en/photo/1127905> data extracted on 19.10.2023)

По видам заполнения пролета между стойками можно выделить следующие варианты:

- с жестким заполнением;
- с гибким (сетчатым) заполнением.

В настоящее время предлагаются и используются различные конструкции удерживающих барьеров. Выбор конструкции снегоудерживающего барьера производится на основе индивидуальных характеристик стартовых зон лавиносборов [12–14].

Одной из основных задач при проектировании снегоудерживающих сооружений является определение расчетных снеговых нагрузок на сооружение [15]. Первооткрывателями в борьбе с лавинами являются швейцарцы и результаты их исследований часто применяются при проектировании удерживающих сооружений. В швейцарских указаниях применяется модель снежного пласта в виде вязкой жидкости. При этом нагрузка снежного пласта на забор, установленный перпендикулярно к склону, определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_o^2 + P_{90}^2}, \quad (1)$$

где P — нагрузка на один погонный метр сооружения, кН/м; P_o — нагрузка, параллельная склону, кН/м, определяется по формуле:

$$P_o = 0,5K_1K_2\gamma H_n^2 \sin 2\alpha, \quad (2)$$

где γ — средний объемный вес снежного покрова, кН/м³; H_n — высота снежного покрова заданной вероятности превышения в зоне зарождения, м; α — крутизна склона в месте установки забора; K_1, K_2 — коэффициенты, которые зависят от характера поверхности, экспозиции склона и от объемного веса снега; P_{90} — нагрузка, кН/м, перпендикулярная к склону, рассчитывается по формуле:

$$P_{90} = f_0(P_o / K_1 \operatorname{tg} \alpha), \quad (3)$$

где f_0 — коэффициент трения, равняется 0,5 для рыхлого снега с объемным весом не более 3 кН/м³ и 0,3 для плотного снега весом 3 кН/м³ и больше.

Аналогичный подход при проектировании и расчете нагрузок на снегоудерживающие сооружения принят в таких странах, как Австрия, Германия и Италия. Согласно такому подходу к определению снеговой нагрузки, снежный покров представляется изоморфным пластом снега, сдвигающийся исключительно по поверхности его контакта со склоном.

В нормативных документах Госстроя СССР, таких как ВСН 02-73, были сохранены основные подходы, которые были заложены в швейцарских указаниях. Действие данные нормативов было отменено, и в настоящее время расчет давления снежных отложений на преграду в РФ регламентируется актуальным нормативным документом. В соответствии с ним распределенное давление снега на преграду определяется выражением:

$$P = \rho_{\text{сн}} g \frac{h_{\text{п}}^2}{2} KN \quad (4)$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность естественно отложенного снежного покрова, кг/м³; $h_{\text{п}}$ — высота снежного покрова, м; K — коэффициент сползания, учитывающий угол наклона склона; N — коэффициент скольжения.

Взаимодействие снежного пласта со снегоудерживающим сооружением в своей диссертационной работе изучал С.С. Шевчук. Автор провёл серию натурных экспериментов, на установке представляющую собой деревянный прямоугольный лоток, установленный на неподвижное основание под углом 35 градусов. Давление снежного пласта измерялось динамометрами, установленными на торцевой стенке лотка. На описанной установке проводились эксперименты по определению давления снежного пласта на сооружение в зависимости от его длины. Снег естественного отложения загружался в лоток при угле наклона 0 градусов, до необходимой высоты и длины снежного пласта, после чего угол наклона постепенно увеличивался до 35 градусов. Плотность снега колебалась от 273 кг/м³ в нижних слоях, до 289 кг/м³ в средней части пласта. Верхний слой обладал плотностью 271 кг/м³. На рисунке 2 показаны результаты вышеописанного эксперимента, которые в дальнейшем будут использованы для верификации предложенной в работе математической модели распределения давления на преграду снежных отложений на склоне.

На основании швейцарского опыта исследования давления снежного покрова на удерживающее сооружение, и полученных значений в результате серий экспериментов, показывающих зависимость давления снежного пласта от отношения длины пласта к его высоте, С.С. Шевчуком была предложена формула расчёта давления, учитывающая соотношение длины снежного пласта, между рядами снегоудерживающих сооружений, к его высоте:

$$P_0 = 0,18 \ln A \gamma_0 h_p^2 K_1 K_2 \sin(2\alpha_c), \quad (5)$$

где A — отношение длины снежного пласта к его высоте; γ_0 — объемный вес снега, кН/м³; h_p — высота снежного покрова, м; K_1 — коэффициент, зависящий от плотности снега; K_2 — коэффициент, зависящий от морфологии, растительности и ориентации склона; α_c — угол наклона склона.

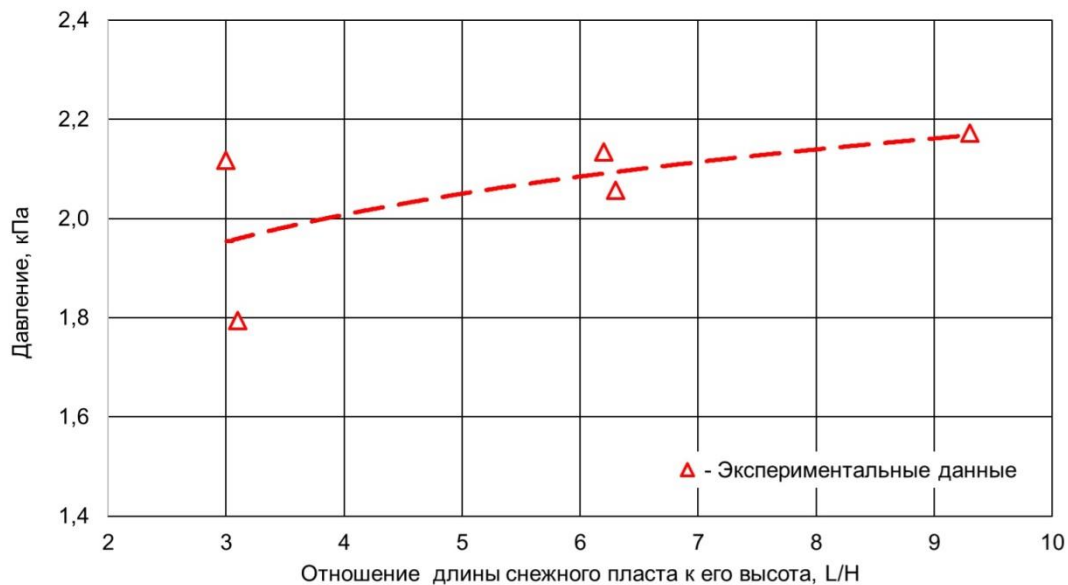


Рисунок 2. Результаты экспериментов (разработано авторами)

Figure 2. Experimental results (developed by the authors)

В своей работе, для определения давления снежного пласта на сооружения, С.С. Шевчук предлагает использовать полученную формулу, когда отношение длины снежного пласта к его высоте меньше 10. В других случаях, когда отношение больше 10, давление следует определять с использованием швейцарских норм, но с учетом местных условий проектирования.

Во всех рассмотренных способах расчета снеговой нагрузки не учитываются ни физико-механические характеристики снега, ни их распределение по глубине снежного покрова, ни возможность каких-либо иных деформаций, отличных от направления, параллельному поверхности склона. Нагрузка при таком расчете получается усреднённой по всей высоте снегоудерживающего сооружения.

Для разработки методики определения параметров распределенной нагрузки необходим комплекс исследований, включающий математическое и физическое моделирование. Предлагаемая в работе дискретная модель позволяет учитывать распределение физико-механических характеристик снежного покрова по слоям, что дает возможность более точного дифференцированного по высоте расчета снеговой нагрузки на снегоудерживающее сооружение.

Дискретная модель распределения статического давления снега на преграду

Discrete model of static snow pressure distribution on the barrier

Альтернативным вариантом определения давления снежного пласта на снегоудерживающее сооружение, является предлагаемая дискретная модель распределения статического давления снега на снегоудерживающее сооружение, со следующими допущениями:

- снежный покров моделируется слоистой средой с неизменными физико-механическими характеристиками в отдельных слоях, ориентированных вдоль наклонной поверхности;
- деформирование снежного массива происходит путем сдвигов по плоским поверхностям, расположенным под углом к склону;
- условие на контакте между сдвигающимися слоями описывается законом сухого трения, при этом каждый слой считается твердым недеформируемым телом.

Важной отличительной особенностью данной модели является введение в постановку задачи еще одного параметра — расстояния между рядами снегоудерживающих сооружений ($L_{\max}$), устанавливаемых ярусами на лавиноопасном склоне (рис. 3). Благодаря введению в этого параметра появляется возможность не только оценивать влияние расстояния между рядами на распределение давления на отдельную преграду, но, что более важно, оптимизировать его величину при проектировании всего снегоудерживающего комплекса.

В данной модели давление на преграду определяется как сумма равнодействующих сил, приложенных к наклонным под углом β к поверхности отдельным слоям или блокам — «склеенным» слоям (рис. 3). Суммирование равнодействующих сил начинается с верхнего (первого) слоя и заканчивается последним (нижним) слоем. При этом, если равнодействующая какого-либо слоя оказывается отрицательной, т. е. удерживающие силы больше сдвигающих, то этот слой считается «склеенным» с нижележащим, образуя блок. Если равнодействующая блока оказывается тоже отрицательной, то к нему добавляется следующий слой, образуя новый блок. По результатам расчетов для углов β в диапазоне от 1 градуса до $(89 - \alpha)$ определяется угол, при котором суммарное воздействие на преграду будет максимальным.

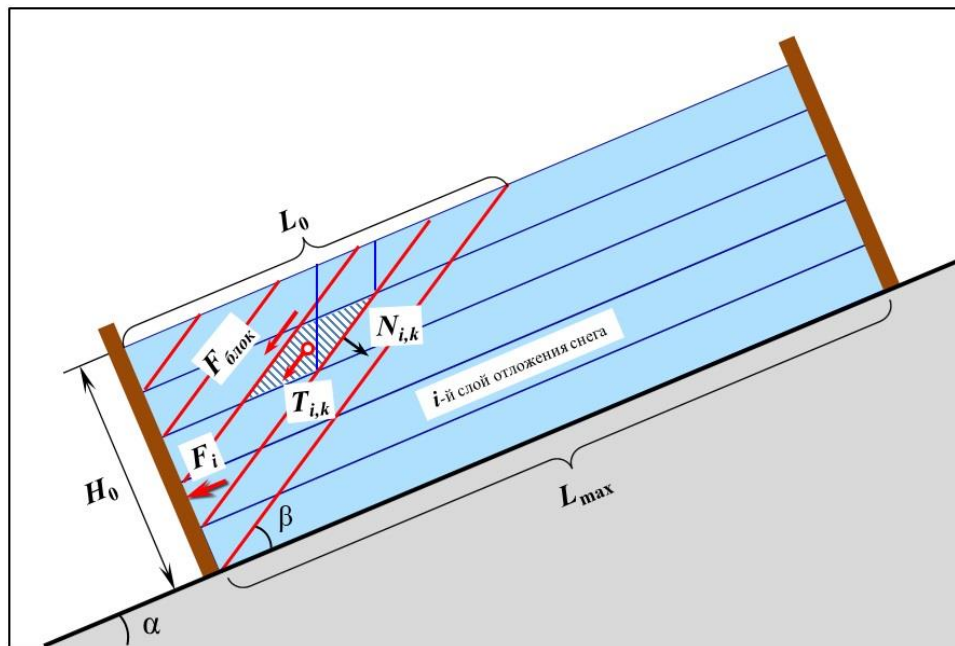


Рисунок 3. Схема к дискретной модели давления снега на преграду (разработано авторами)

Figure 3. Schematic diagram to the discrete model of snow pressure on the barrier (developed by the authors)

Расчет равнодействующей силы для каждого наклонного слоя осуществляется путем разбиения слоя на отдельные элементы ромбической формы, как показано на рисунке 3. Сдвигающая сила i -го элемента равна:

$$T_{i,k} = Q_{i,k} \cdot \sin(\alpha + \beta), \quad (5)$$

где $Q_{i,k}$ — вес (i,k) -го элемента, определяемый выражениями:

$$Q_{i,k} = \rho_{i,k} \cdot g \cdot \Delta h^2 \cdot \operatorname{ctg} \beta, \quad (\text{при } i < k), \quad (6)$$

$$Q_{i,k} = \frac{1}{2} \rho_{i,k} \cdot g \cdot \Delta h^2 \cdot \operatorname{ctg} \beta, \quad (\text{при } i = k), \quad (7)$$

где $\rho_{i,k}$ — плотность (i,k) -го элемента, кг/м³; $\Delta h = H_0 / n$ — толщина одного слоя снежного покрова, м; H_0 — толщина снежного покрова, м; n — количество расчётных слоев. Отсчёт слоев ведется сверху вниз.

Сдвигающая сила i -го наклонного слоя определяется суммированием сдвигающих сил всех элементов слоя i , в соответствии с (5), равна:

$$T_i = \sum_{k=1}^{k=i} T_{i,k}. \quad (8)$$

Для определения силы сопротивления по подошве i -го наклонного слоя разобьем вышележащую область на вертикальные столбцы, как показано на рисунке 3. Тогда нормальная сила давления (i, k) -го столбца на его подошву будет определена выражением:

$$N_{i,k} = \sum_{j=1}^{j=i} Q_{i,k,j} \cos(\alpha + \beta), \quad (9)$$

где $Q_{i,k,j}$ — вес (i, k, j) -го элемента вертикального (i, k) -го столбца,

$$Q_{i,k,j} = \rho_{i,k,j} \cdot g \cdot \Delta b \cdot \Delta h, \text{ (при } j < k \text{);}$$

$$Q_{i,k,j} = \frac{1}{2} \rho_{i,k,j} \cdot g \cdot \Delta b \cdot \Delta h, \text{ (при } j = k \text{);}$$

$\rho_{i,k,j}$ — плотность (i, k, j) -го элемента, кг/м³; Δb — длина подошвы (i, k, j) -го элемента вдоль снежных отложений, м;

$$\Delta b = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta l^2 - 2\Delta H \cdot \Delta l \cdot \sin(\alpha + \beta)}, \text{ м,}$$

$\Delta H = \Delta h / \cos \alpha$ — высота слоя отложения снега, м;

$\Delta l = \Delta h / \sin \alpha$ — длина подошвы вертикального столбца, м.

Сила трения по подошве i -го наклонного слоя равна:

$$F_{mp,i} = \sum_{k=1}^{k=i} N_{i,k} \cdot k_{mp,i}, \quad (10)$$

где $k_{mp,i} = \operatorname{tg} \varphi_i$ — коэффициент внутреннего трения i -м слое отложения;
 φ_i — угол внутреннего трения в i -м слое отложения.

Суммарная сила сцепления по подошве i -го наклонного слоя равна:

$$F_{c,i} = \sum_{k=1}^{k=i} C_k \cdot \Delta l, \quad (11)$$

где C_k — удельное сцепление в k -ом слое отложения.

Тогда суммарную силу сопротивления по подошве i -го наклонного слоя можно записать в следующем виде:

$$F_{conp,i} = F_{mp,i} + F_{c,i}. \quad (12)$$

При определении распределения давления наклонных слоев на преграду возможны два случая. Первый — если $T_1 > F_{conp,1}$. Тогда сила воздействия на преграду 1-го слоя снега определяется выражением:

$$F_1 = (T_1 - F_{conp,1}) \cos(\alpha + \beta). \quad (13)$$

В этом случае, при «активном» 1-м слое, ко 2-му слою на его контакте со 1-м слоем будет приложена дополнительная сдвигающая сила $F_{\text{снр},1}$. Тогда сила воздействия на преграду 2-го слоя снега F_2 определится выражением

$$F_2 = (T_2 - F_{\text{снр},2} + F_{\text{снр},1}) \cos(\alpha + \beta). \quad (14)$$

Второй случай — когда $T_1 < F_{\text{снр},1}$, 1-й слой не будет «активным» и произойдёт его «склейка» со 2-м. При этом, если выполняется условие $T_1 + T_2 > F_{\text{снр},2}$, то на преграду будет воздействовать уже блок, состоящий из двух слоев с силой:

$$F_{\text{блок},2} = (T_1 + T_2 - F_{\text{снр},2}) \cos(\alpha + \beta). \quad (15)$$

Ниже приводится пример расчета распределения давления снежных отложений на снегоудерживающее сооружение с реальными физико-механическими характеристиками снега (рис. 4).

Параметры снежных отложений

Характеристики слоев снежных отложений

Глубина слоя, м	.2	.4	.6	.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Плотность снега, кг/м ³	200	220	210	300	350	346	362	370	370	420
Удельное сцепление, кПа	.01	.05	.09	.15	.75	.93	.98	1.05	1.52	2
Угол внутреннего трения	15	17	24	20	23	22	26	29	30	31

OK Сохранить Загрузить

Рисунок 4. Характеристики снежных отложений (разработано авторами)

Figure 4. Characteristics of snow deposits (developed by the authors)



Рисунок 5. Расчет распределения давления снега на преграду (разработано авторами)

Figure 5. Calculation of snow pressure distribution on the barrier (developed by the authors)

Расчет выполнялся с помощью специально разработанной компьютерной программе «Снег-1», в которой реализована вышеописанная модель. Главный интерфейс программы и результаты расчета показаны на рисунке 5. В центральном окне показан график распределения давления расчетных слоев снежных отложений на преграду — снегоудерживающий панель, при равномерно распределенных характеристиках снега по глубине.

Верификация дискретной модели

Verification of the discrete model

Первым шагом к верификации предложенной модели, как было отмечено выше, является сравнение экспериментальных данных, описанных в диссертационной работе Шевчука С.С. с результатами расчета по дискретной модели. Это сравнение показано на рисунке 6. Как следует из приведенного рисунка, расчетные значения неплохо отражают экспериментальные результаты с учетом изменения расстояния между рядами снегоудерживающих сооружений.

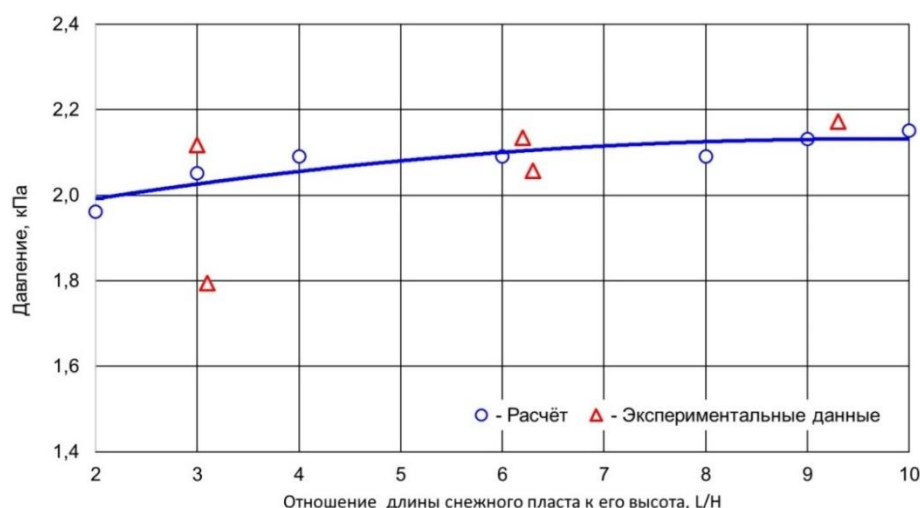


Рисунок 6. Результаты усредненного давления снега на преграду (разработано авторами)

Figure 6. Results of averaged snow pressure on the barrier (developed by the authors)

Дальнейшая верификация дискретной модели распределения статического давления снега на преграду была проведена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях. Поскольку в модели свойства снега задаются тремя физико-механическими характеристиками — плотностью, удельным сцеплением и углом внутреннего трения, то сравнение удобнее всего было выполнить с использованием материала со стабильными характеристиками, не меняющимися в процессе эксперимента. В качестве такого материала был выбран сухой речной песок со следующими характеристиками:

- плотность $\rho = 1\,800\text{ кг/м}^3$;
- удельное сцепление $c = 2\text{ кПа}$;
- угол внутреннего трения $\varphi = 36^\circ$.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных проводилось путем сопоставления графиков распределения давления песка по глубине на стенку преграды высотой 20 см при различных углах наклона лотка, в котором размещался песок. Расстояние между рядами, моделируемое в эксперименте длиной лотка, было фиксированным, и равнялось 1 м.

Физическое моделирование

Physical modelling

Для верификации разработанной дискретной модели была разработана экспериментальная установка, представляющая собой лоток с прозрачными стенками из оргстекла, и сплошным барьером, расположенным у торцевой части с закрепленным на нём измерительным комплексом (рис. 7).

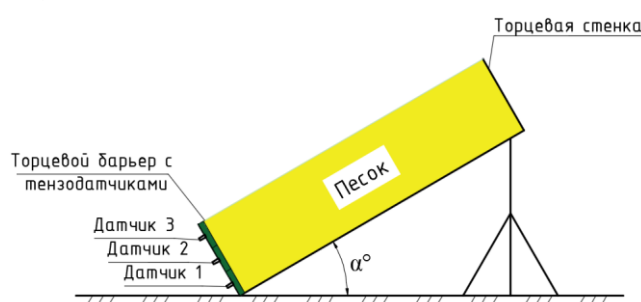


Рисунок 7. Схема установки (разработано авторами)

Figure 7. Installation scheme (developed by the authors)



1 — конвертер ICP DAS I-7561; 2 — модуль вывода ICP DAS I-7080D

1 — converter ICP DAS I-7561; 2 — output module ICP DAS I-7080D

Рисунок 8. Измерительный комплекс (разработано авторами)

Figure 8. Measuring system (developed by the authors)

Измерительный комплекс представляет собой тензодатчики подключенные при помощи витой пары к двухканальным модулям вывода, находящимися в связке с конвертером (рис. 8). Далее конвертер при помощи USB кабеля присоединяется к ноутбуку, на котором показания датчиков выводятся в виде осциллограммы. Тензодатчик представляет собой упругий элемент, с наклеенными на него фольговыми тензорезисторами, объединенными в мост Уилсона (рис. 9).

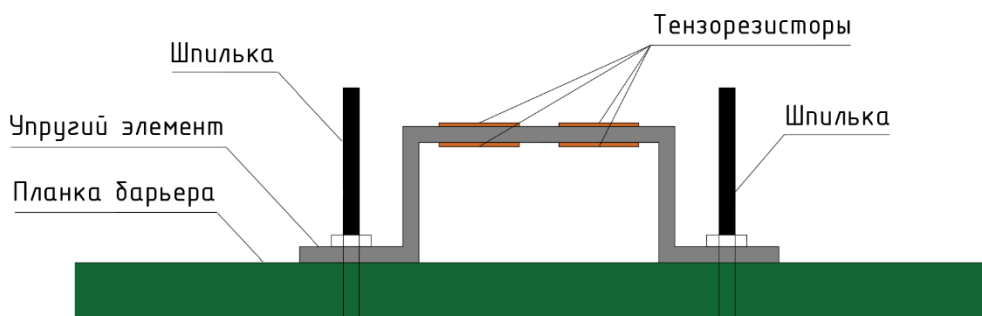


Рисунок 9. Схема установки тензодатчика (разработано авторами)

Figure 9. Tensiometer installation scheme (developed by the authors)

Тензодатчики располагались на планках барьера с шагом 5 см по высоте относительно друг друга. Далее в лоток засыпался речной песок, слоем толщиной 20 см, после чего производился поэтапный подъем лотка до 30 градусов.

По результатам подъема лотка был получен график распределения давления сыпучего материала по высоте на преграду в зависимости от угла наклона (рис. 10).

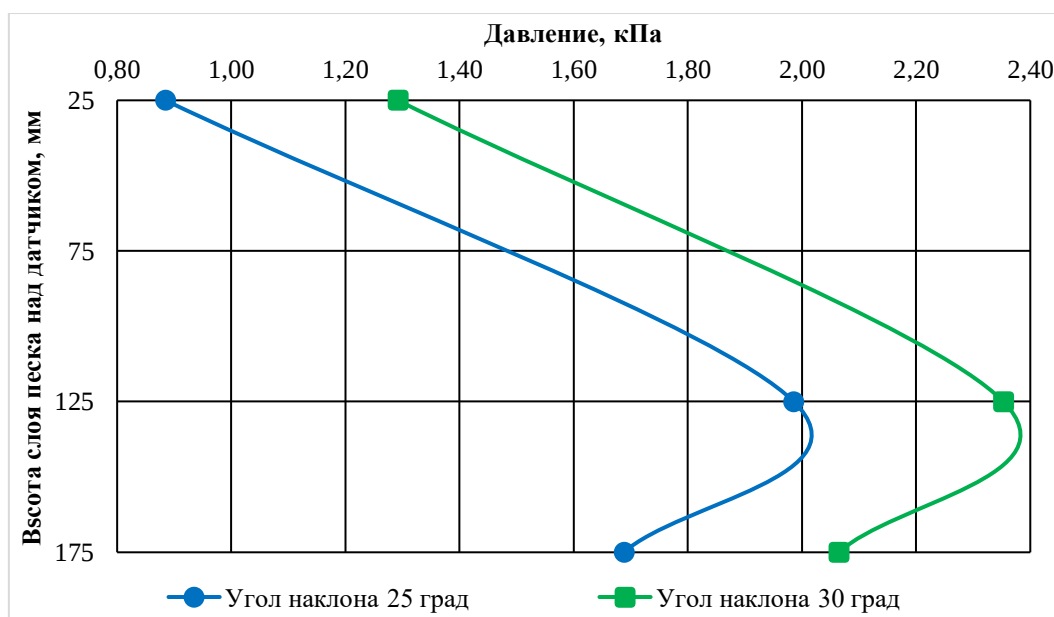


Рисунок 10. Графики с результатами лабораторных измерений (разработано авторами)

Figure 10. Graphs with the laboratory measurements results (developed by the authors)

На рисунке 11 приведены результаты расчетов в рамках вышеописанной дискретной модели с исходными параметрами задачи, соответствующими вышеописанному лабораторному эксперименту.

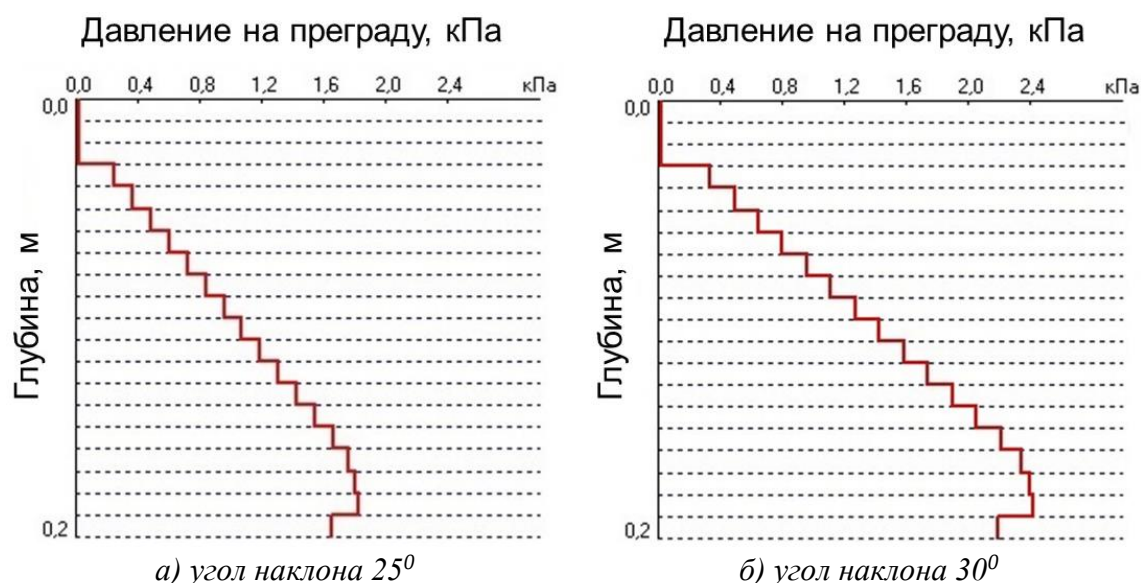


Рисунок 11. Расчетное распределение давления песка на преграду в зависимости от угла наклона лотка (разработано авторами)

Figure 11. Sand pressure computational distribution on the barrier depending on the angle of chute inclination (developed by the authors)

Из сопоставления экспериментальных и расчетных графиков (рис. 10, 11) следует, что как характер распределения давления сыпучей среды на преграду, так и его максимальные значения, в обоих случаях идентичны. Это свидетельствует о непротиворечивости предложенной модели при описании приведенного эксперимента. В дальнейшем необходимо продолжить процесс верификации дискретной модели с использованием натурных экспериментов по определению давления снежных отложений на преграду с различными углами наклонной плоскости.

Заключение

Conclusion

1. Существующие подходы к оценке снегового давления на снегоудерживающие сооружения не только не учитывают сами прочностные характеристики снега — удельное сцепление и угол внутреннего трения, но и их распределение по толщине снежного покрова на лавиноопасном склоне.
2. Имеющиеся оценки давления снежных масс на снегоудерживающие сооружения дают только усредненные значения по их высоте без возможности их дифференциации по вертикальной координате.

3. В статье предложена дискретная модель распределения давления снежных масс на снегоудерживающие сооружения по их высоте с учетом основных физико-механических характеристик снега, распределенных по толщине снежного покрова.
4. Выполненная верификация предложенной модели показала ее адекватность при оценке распределения давления сыпучего материала на преграду по ее высоте.
5. Сравнение расчетных данных с результатами натурных экспериментов, взятых из открытой печати, также показало неплохую сходимость значений усредненного по высоте снегоудерживающего сооружения давления снега в обоих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Генсиоровский, Ю.В.** Определение снеговых нагрузок на сооружения при проведении инженерных изысканий: разработка региональных нормативных документов по снеговым нагрузкам (на примере Сахалинской области) / Ю.В. Генсиоровский, Н.А. Казаков, С.П. Жируев [и др.] // ГеоРиск. — 2011. — № 3. — С. 14–20. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17646670>. — EDN OWEFKT. (дата обращения: 16.11.2023).
2. **Боброва, Д.А.** Расчетная и фактическая максимальная дальность выброса лавины / Д.А. Боброва // ГеоРиск. — 2011. — № 4. — С. 24–26. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17646926>. — EDN OWEJFF. (дата обращения: 16.11.2023).
3. **Larsen, J.O.** The temporal and spatial variation of snow pressure on structures / J.O. Larsen, D.M. Mcclung, S.B. Hansen // Canadian Geotechnical Journal. — 1985. — Т 22. — № May 2. — С. 166–71. — URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object?id=00156539-c178-4103-a76a-4a59a3c07b78>. (дата обращения: 16.11.2023).
4. **Larsen, J.O.** Snow-Creep Pressure on Masts / J.O. Larsen, J. Laugesen, K. Kristensen. — DOI <https://doi.org/10.3189/S0260305500007801> // Annals of Glaciology. — 1989. — Т 13. — С. 154–158. — URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/snowcreep-pressure-on-masts/EFA71A943E1C61695237EAA65FC2DF2E>. (дата обращения: 16.11.2023).
5. **Солодянкина, А.А.** К вопросу об исследовании лавин для дорожного строительства / А.А. Солодянкина, М.О. Карпушко. — DOI <https://doi.org/10.15593/24111678/2023.02.10> // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2023. — № 2. — С. 98–111. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54072176>. — EDN СННРКМ. (дата обращения: 16.11.2023).
6. **Якимова, А.В.** Обеспечение безопасности при сходе снежных лавин на территории Красноярского края / А.В. Якимова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. — 1992. — № 3. — С. 28–34. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30397665>. — EDN ZPEZPP. (дата обращения: 16.11.2023).
7. **Чеботарев, С.И.** Организация противолавинной защиты на Сахалинском регионе Дальневосточной / С.И. Чеботарев, О.В. Паршукова, А.В. Алтухов [и др.] // Физика, химия и механика снега: сборник докладов III Международного симпозиума, Южно-Сахалинск, 02–06 октября 2017 года. Том Часть 2 / Южно-Сахалинск: Полиграфическая компания "Кано", 2017. — С. 89–94. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30529821>. — EDN ZSCEOV. (дата обращения: 20.11.2023).
8. **Жируев, С.П.** Лавинная опасность на автомобильных и железных дорогах Сахалина и Курил / С.П. Жируев, В.И. Окопный, Н.А. Казаков, Ю.В. Генсиоровский // ГеоРиск. — 2010. — № 4. — С. 50–57. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15570945>. — EDN NCTFKZ. (дата обращения: 20.11.2023).

9. Викулина, М.А. К вопросу о терминологии и показателях лавинной деятельности / М.А. Викулина, А.Л. Шныпарков // Материалы гляциологических исследований. — 2008. — № 105. — С. 12–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13002805>. — EDN KYOBV. (дата обращения: 22.11.2023).
10. Исаков, А.Л. Новый подход к системе противолавинной защиты объектов инфраструктуры / А.Л. Исаков, С.С. Шевчук, Ю.С. Морячков // Путь и путевое хозяйство. — 2015. — № 6. — С. 33–36. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23855127>. — EDN UCAOMV. (дата обращения: 10.10.2023).
11. Григорьева, Т. Инженерная защита от снежных лавин. Типы и особенности снегоудерживающих конструкций / Т. Григорьева // Инженерная защита. — 2014. — № 4. — С. 50–55. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23144488>. — EDN TMMGCD. (дата обращения: 25.11.2023).
12. Божинский, А.Н. Проблемы эффективности защиты от снежных лавин / А. Н. Божинский, А.А. Жигульский, Л.А. Канаев, М.Н. Лаптев, С.М. Мягков [и др.]. — М.: ВИНТИ, 1991. — 280 с.
13. Margreth, S. New technical guidelines on snow supporting structures in avalanche starting zones / S. Margreth // International Snow Science Workshop / Уистлер: ISSW, 2008. — С. 867–874. — URL: https://www.researchgate.net/publication/267965444_New_technical_guidelines_on_snow_supporting_structures_in_avalanche_starting_zones. (дата обращения: 23.11.2023).
14. Подвербный, В.А. Проектирование противолавинных сооружений на Восточно-Сибирской железной дороге / В.А. Подвербный, Е.В. Филатов, Б.П. Мухаров [и др.] // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока: межвузовский сборник научных трудов / Под редакцией В.С. Шварцфельда. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2009. — С. 247–258. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25754740>. — EDN VRPJHF. (дата обращения: 22.11.2023).
15. Шевчук, С.С. Проектирование и строительство защиты объектов от лавин / С. С. Шевчук, Л.В. Николаева, С.М. Кузнецов // Экономика железных дорог. — 2018. — № 1. — С. 55–61. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32502646>. — EDN YQDJNX. (дата обращения: 23.10.2023).

Сведения об авторах:

Исаков Александр Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Изыскание, проектирование, постройка железных и автомобильных дорог», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия, e-mail: Mylab@ngs.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=67770

Ковалев Никита Юрьевич — преподаватель, аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия, e-mail: Kovalev.unoff@mail.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1217617

Статья получена: 03.11.2023. Принята к публикации: 15.01.2024. Опубликовано онлайн: 29.01.2024.

REFERENCES

1. Gensorovsky Yu.V., Kazakov N.A., Zhiruev S.P., Okopny V.I., Lobkina V.A. Determination of Snow Loads on Structures for Engineering Survey in The Sakhalin Region. *Georisk World*. 2011; (3): 14–20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17646670> (accessed 16th November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Bobrova D.A. The Calculated and Actual Maximal Avalanche Run-Out Distance. *Georisk World*. 2011; (4): 24–26. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17646926> (accessed 16th November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Larsen J.O., Mcclung D.M., Hansen S.B. The temporal and spatial variation of snow pressure on structures. *Canadian Geotechnical Journal*. 1985; 22 (May 2): 166–71. Available at: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=00156539-c178-4103-a76a-4a59a3c07b78> (accessed 16th November 2023). (In Eng.).
4. Larsen J.O., Laugesen J., Kristensen K. Snow-Creep Pressure on Masts. *Annals of Glaciology*. 1989; 13: 154–158. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3189/S0260305500007801>.

5. Solodianskina A.A., Karpushko M.O. To The Question of The Study of Avalanches for Road Construction. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2023; (2): 98–111. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2023.02.10>.
6. Yakimova A.V. Providing Safety During the Snow Avalanches on the Krasnoyarsk Territory. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 1992; (3): 28–34. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30397665> (accessed 16th November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Chebotaryov S.I., Parshukova O.V., Altukhov A.V., Bu A.B., Lozhkomoev V.V. Avalanche Protection of The Far Eastern Railway in The Sakhalin Region. In: *Proceedings of the III International Symposium on "Physics, Chemistry and Mechanics of Snow". Part II*. Yuzno-Sakhalinsk: KANO; 2017. p. 89–94. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30529821> (accessed 20th November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Zhiruyev S.P., Okopnyy V.I., Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V. Avalanche danger on roads and railways of Sakhalin and the Kuril Islands. *Georisk World*. 2010; (4): 50–57. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15570945> (accessed 20th November 2023). (In Russ.).
9. Vikulina M.A., Shnyparkov A.L. [On the issue of terminology and indicators of avalanche activity]. *Materials of glaciological studies*. 2008; (105): 12–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13002805> (accessed 22nd November 2023). (In Russ.).
10. Isakov A.L., Shevchuk S.S., Moryachkov Yu.S. A New Approach to The System of Avalanche Protection of Infrastructure Facilities. *Railway Track and Facilities*. 2015; (6): 33–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23855127> (accessed 10th October 2023). (In Russ.).
11. Grigor'yeva T. [Engineering protection against avalanches. Types and features of snow retention structures]. *Inzhenernaya zashchita = Engineering protection*. 2014; (4): 50–55. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23144488> (accessed 25th November 2023). (In Russ.).
12. Bozhinskiy A.N., Zhigul'skiy A.A., Kanayev L.A., Laptev M.N., Myagkov S.M. et al. Problemy effektivnosti zashchity ot snezhnykh lavin [Problems with the effectiveness of avalanche protection]. Moscow: VINITI RAS; 1991. (In Russ.).
13. Margreth S. New technical guidelines on snow supporting structures in avalanche starting zones. In: *International Snow Science Workshop*. Whistler, BC, Canada: ISSW; 2008. p. 867–874. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267965444_New_technical_guidelines_on_snow_supporting_structures_in_avalanche_starting_zones (accessed 23rd November 2023). (In Eng.).
14. Podverbnyy V.A., Filatov E.V., Mukharov B.P. et al. [Design of avalanche control structures on the East Siberian Railway]. In: Shvartsfel'd V.S. (ed.). *Features of the design and construction of railways in the conditions of the Far East: interuniversity collection of scientific papers*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2009. p. 247–258. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25754740> (accessed 22nd November 2023). (In Russ.).
15. Shevchuk S.S., Nikolaev L.V., Kuznetsov S.M. Design and Construction of Protection Facilities Against Avalanches. *The Railway Economics*. 2018; (1): 55–61. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32502646> (accessed 23rd October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Alexander L. Isakov — Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk, Russia,
e-mail: Mylab@ngs.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=67770

Nikita Yu. Kovalev — Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk, Russia,
e-mail: Kovalev.unoff@mail.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1217617

Submitted: 3rd November 2023. Revised: 15th January 2024. Published online: 29th January 2024.