

МАШИНА ЖАСАУ, АСПАП ЖАСАУ  
МАШИНОСТРОЕНИЕ, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING, INSTRUMENTATION

DOI 10.51885/1561-4212\_2022\_2\_71  
MPHTI 55.55.31

**М.В. Дудкин<sup>1</sup>, Б.А. Молдаханов<sup>2</sup>, Е.Л. Дудкина<sup>3</sup>, А.И. Ким<sup>4</sup>, А.Б. Бугаев<sup>5</sup>**

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>1</sup>E-mail: vas\_dud@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: bek\_m78@mail.ru\*

<sup>3</sup>E-mail: vas\_dud@mail.ru

<sup>4</sup>E-mail: alinakim3107@mail.ru

<sup>5</sup>E-mail: andbugaev@mail.ru

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СНЕГА ПРИ ЕГО РАЗРАБОТКЕ ФРЕЗЕРНО-РОТОРНЫМИ СНЕГООЧИСТИТЕЛЯМИ

### ФРЕЗЕРЛІ-РОТОРЛЫ ҚАР ТАЗАЛАҒЫШТАРМЕН ҚАР ТАЗАЛАУ КЕЗІНДЕГІ ҚАРДЫҢ НЕГІЗГІ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЫҚТИМАЛДЫ БАҒАЛАУ

### PROBABILISTIC EVALUATION OF THE MAIN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SNOW DURING ITS PROCESSING BY MILLING-ROTARY SNOWPLOWS

**Аннотация.** Материалы статьи визуально, графиками, а также посредством таблицы и полученных математических зависимостей и параметров показывают условия работы снегоочистителей, зависящие от свойств разрабатываемого снежного массива, от температуры, от способов разработки и внутренних изменений структуры снега. Определение наиболее вероятных значений параметров, характеризующих свойства снега, имеет решающее значение для расчета сопротивлений, возникающих при работе снегоуборочного оборудования, так как с изменением сопротивлений при взаимодействии рабочих органов с разрабатываемым снежным массивом, соответственно изменяются энергоемкость процесса разработки снега, тяговые сопротивления и производительность машин.

**Ключевые слова:** фрезерно-роторный снегоочиститель, резание и сдвиг снега, снежная масса, плотность снега, энергоемкость.

**Аңдатпа.** Мақала материалдары көзбен, графиктермен, сондай-ақ алынған математикалық тәуелділіктер мен параметрлер арқылы, қар тазартқыштардың жұмыс істеу жағдайларын, тазаланатын қар массивінің құрылымына, олардың температураға тәуелділігіне және қар құрылымын тазалау әдістері мен оның ішкі өзгеруіне тікелей байланыстылығын көрсетеді. Қардың қасиеттерін сипаттайтын параметрлердің ықтимал мәндерін анықтау, қар жинайтын жабдықтың жұмысында пайда болатын кедергілерді есептеу үшін өте маңызды. Өйткені, жұмыс органдарының тазаланатын қар массивімен өзара әрекеттесуі кезінде қарсылықтардың өзгеруімен қатар, сәйкесінше қарды тазалау процесінің энергия сыйымдылығы, тарту кедергісі және машиналардың өнімділігі өзгереді.

**Кілтті сөздер:** фрезерлік-роторлы қар тазалағыш, қарды кесу және жылжыту, қар массасы, қардың тығыздығы, энергия сыйымдылығы.

**Abstract.** *The materials of the article visually, graphically, as well as by means of a table and the obtained mathematical dependencies and parameters, show the working conditions of snowplows that depend on the properties of the snow mass being developed, on temperature, on the methods of development and internal changes in the structure of snow. Determining the most probable values of the parameters characterizing the properties of snow is crucial for calculating the resistances that arise during the operation of snow removal equipment. Since with the change in resistances during the interaction of working bodies with the developed snow mass, the energy intensity of the snow development process, traction resistances and machine performance change accordingly.*

**Keywords:** *milling and rotary snowplow, snow cutting and shifting, snow mass, snow density, energy consumption.*

*Введение.* В Республике Казахстан климат очень разнообразен и по его температурному влиянию территория разделена на 6 основных регионов. Восточный Казахстан относится ко второму региону. В данной статье рассмотрены условия работы снегоочистительных машин применительно к условиям и в условиях зимних осадков Восточного Казахстана.

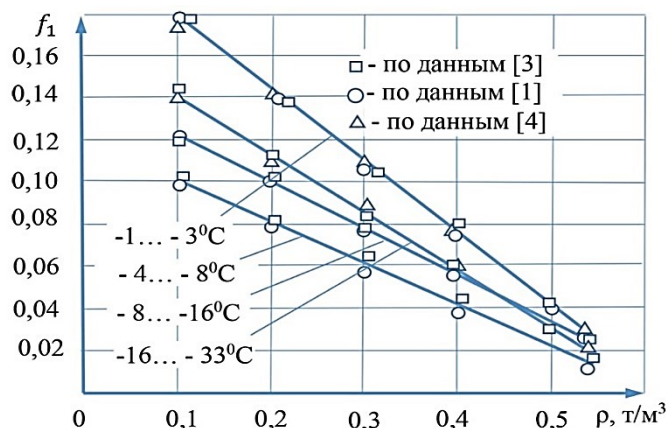
При разработке снега снегоочистительными и снегоуборочными машинами, имеющими в качестве рабочего органа шнек или фрезу, возникает суммарное сопротивление, которое можно свести к следующим основным видам: сопротивление перерезыванию, являющееся результатом разделения снежного массива на части с нарушением связи между этими частями; сопротивление сдвигу, возникающее при отделении и смещении в заданном направлении фрагмента разрабатываемого снежного массива; сопротивление сжатию, возникающее в результате сближения снежных частиц под влиянием давления на снег при одновременном уменьшении объема сжимаемой части снежного забоя. Аналогично теории резания грунтов [1, 2] перечисленные сопротивления характеризуются обобщаемым показателем – удельным сопротивлением резанию  $K_{рез}$ . Кроме того, при взаимодействии рабочего органа снегоочистительной и снегоуборочной машин с разрабатываемым снежным массивом необходимо преодолевать сопротивление трения скольжения снега по рабочему органу и сопротивление трения снега по снегу. Эти сопротивления характеризуются коэффициентами соответственно внешнего трения  $f_1$  и внутреннего трения  $f_2$ .

*Материал и методы исследования.* Величины коэффициентов  $f_1$ ,  $f_2$  и  $K_{рез}$  в основном зависят от объемной массы снега  $\rho$  и температуры снега [3, 4, 7, 8], равной в естественном залегании температуре окружающего воздуха [7].

На основе данных [1, 3, 4] были графически построены интерпретации (рис. 1, 2, 3) и получены зависимости корреляции (табл. 1) основных физических свойств снега: удельного сопротивления резанию  $K_{рез}$  и коэффициентов внешнего трения  $f_1$  и внутреннего трения  $f_2$  от значений объемной массы  $\rho$  снежного массива и температуры окружающего воздуха  $t^0$ .

Сделаем анализ закономерностей изменения показателей  $K_{рез}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  от объемной массы снежного массива и температуры окружающего воздуха [5, 9-11].

От объемной массы  $\rho$  снега зависит коэффициент внешнего трения  $f_1$ , данные замеров которого при различных температурах окружающего воздуха даны на рис. 1.

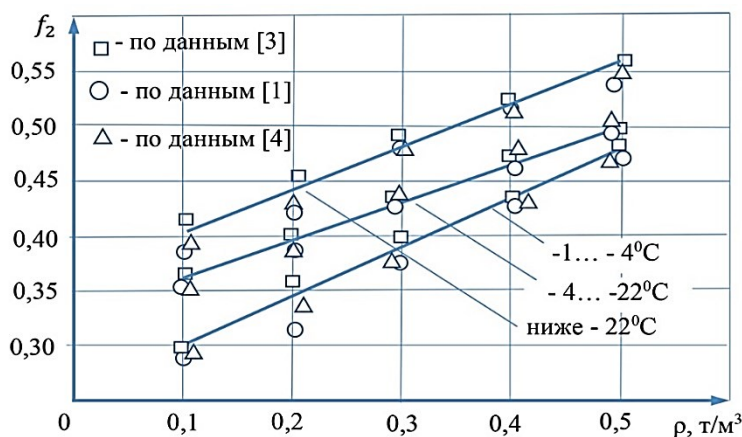


**Рисунок 1.** Зависимость коэффициента внешнего трения  $f_1$  от параметров  $t^0$  и  $\rho$  снежного массива

При увеличении объемной массы  $\rho$  и температуры  $t^0$  снега, уменьшается коэффициент  $f_1$  внешнего трения. Объясняется это следующим: уплотнение свежесвыпавшего снега может проходить под давлением собственного веса, которое с нанесением новых пластов снежного покрытия с еще большим усилием давит на нижележащие, вызывая тем самым еще большее уплотнение [12-14].

На рис. 2 дана графическая зависимость коэффициента внутреннего трения  $f_2$  от температурных показателей  $t^0$  и объемной массы  $\rho$  снежного массива. С возрастанием  $\rho$  и  $t^0$  коэффициент внутреннего трения массива снега также увеличивается. С возрастанием плотности начинает изменяться форма снежных кристалликов, которые в виде пластин и звезд делятся на части.

С понижением температуры снежного слоя связи между кристаллами становятся крепче, а значение коэффициента внутреннего трения  $f_2$  выше.



**Рисунок 2.** Изменение коэффициента внутреннего трения  $f_2$  в зависимости от объемной массы  $\rho$  и  $t^0$  снежной массы

По графической зависимости удельного сопротивления резанию  $K_{рез}$  от температуры и объемной массы снега (рис. 3) можно сделать вывод о параболическом законе изменения

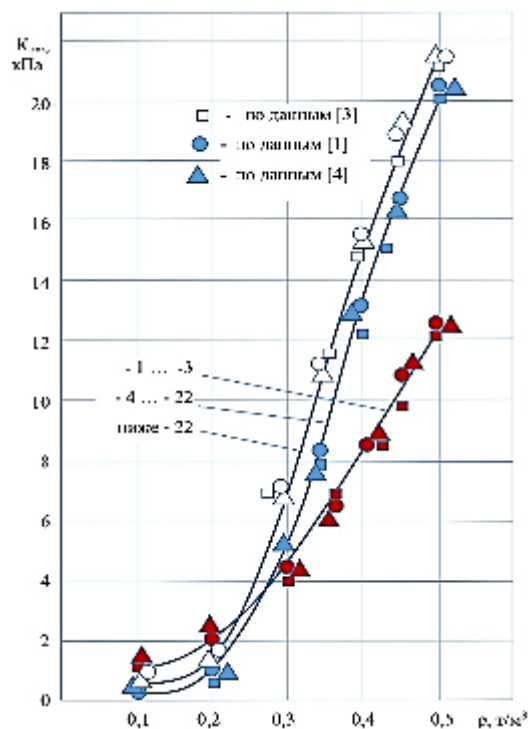
удельного сопротивления резанию в функции температуры и объемной массы снежного покрова. Увеличение объемной массы ведет к резкому росту  $K_{рез}$ . Упрочнение снега происходит за счет его уплотнения во внутренних пластах, увеличивающего численность и площадь контакта между внутренними частицами.

Случающиеся процессы округления зерен снега из-за сублимации, а также уплотнение и смерзание зерен по поверхности их контакта, приводят к увеличению значения  $K_{рез}$  при понижении температуры снега [7, 15].

Зерна льда диаметром до 1 мм, входящие в образующийся мелкозернистый снег, формируют ледяную пространственную решетку и уплотняются, что в итоге приводит к дальнейшему уплотнению всей снежной массы. Происходит постепенный переход снега из мелкозернистого состояния в среднезернистый, в котором частицы достигают размера до 2 мм, а затем в крупнозернистый с размером частиц более 2 мм.

В случае быстрого проседания верхних пластов слежавшегося снега, а также из-за воздействия внешних нагрузок в зернах, находящихся на поверхности контакта и рядом с ней, между кристаллами снега генерируются местные повышенные напряжения. Разнородность данных напряжений в ледяных зернах предопределяет их рекристаллизацию.

В случае механического разрушения снежной массы, происходящего при ее фрезеровании, снег за счет сопутствующего уплотнения начинает затвердевать.



**Рисунок 3.** Изменение коэффициента сопротивления резанию  $K_{рез}$  от температуры  $-t^{\circ}\text{C}$  и объемной массы  $\rho$  снежной массы

*Результаты и их обсуждения.* Изменения структуры снега при его деформации от внешних механических нагрузок интенсифицируются за счет получаемой во время работы тепловой энергии, расходуемой на уплотнение и пластическую деформацию снежной

массы.

Некоторые параметры изменения объемной массы снежного слоя от  $0,1 \text{ т/м}^3$  до  $0,65 \text{ т/м}^3$ , соответствующие средним параметрам состояния снега от плотного слежавшегося до свежеснежного, рассмотрены после анализа его физико-механических свойств во всех региональных зонах РК.

Смыканию полостей между кристаллами снега соответствует его критическая объемная масса  $\rho = 0,7 \text{ т/м}^3$  [16], которая разграничивает возможность вытеснения воздуха из пор. В случае уплотнения снега с меньшей объемной массой, воздух может вытесняться из его пор, а при уплотнении снега с большей плотностью воздуха нет места для вытеснения, снег начинает упруго препятствовать сжатию вплоть до перехода в фазу льда, который имеет физико-механические свойства, отличающиеся от снежных.

Из-за того, что при  $\rho \rightarrow 0$  значения параметров  $K_{\text{рез}}$ ,  $f_1$  и  $f_2$ , характеризующие основные свойства снежного массива, ничтожно малы, они не могут оказать какого-либо влияния на процесс фрезерования снега рабочим органом снегоочистителя.

Полученные корреляционные зависимости (табл. 1) параметров  $K_{\text{рез}}$ ,  $f_1$  и  $f_2$  от объемной массы снега  $\rho$  справедливы для определенных температурных интервалов. Однако вероятностные интервалы изменения температуры снега, полученные в результате обработки статистических данных [2, 5, 8, 17], не совпадают с интервалами температур, используемых в выражениях табл. 1, что вызывает необходимость корректировки этих зависимостей с учетом пределов изменения температур [2, 5]. С этой целью были использованы методы теории вероятности [6] при определении плотности вероятности связей температуры воздуха в зависимости от параметров  $K_{\text{рез}}$ ,  $f_1$  и  $f_2$ . В качестве примера приведем методику корректировки корреляционных зависимостей для региона (произвольно), которому характерны вероятностные интервалы изменения температуры  $t^0 = -17,7 \dots 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  и объемной массы снега  $\rho = 0,23 \dots 0,31 \text{ т/м}^3$  [2, 5]. Согласно выведенным корреляционным зависимостям (табл. 1) коэффициент внешнего трения  $f_1$  для данного температурного интервала определяется по формуле:  $f_1 = 0,168 - 0,271\rho$ .

Для определения коэффициента внутреннего трения необходимо воспользоваться сразу двумя корреляционными зависимостями:  $f_2 = 0,33 + 0,34\rho$  для  $t^0 = -4 \dots -22 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $f_2 = 0,36 + 0,39\rho$  для  $t^0$  ниже  $-22 \text{ } ^\circ\text{C}$ , так как вероятностный температурный интервал не совпадает полностью ни с одним температурным интервалом, для которого выведены корреляционные зависимости (табл. 1).

Для объединения этих уравнений в одно воспользуемся правилом теории вероятности, согласно которому изменяющиеся равномерно в определенном интервале случайные события (как в данном случае) равновероятны. Коэффициент внутреннего трения описывается формулой вида  $y = a + b\rho$ . Используя формулу условных вероятностей или формулу Байеса для равновероятных событий [6], получим

$$a = \int_{17,7}^{22} 0,33\omega(t)dt + \int_{22}^{27,5} 0,36\omega(t)dt = 0,35;$$

$$b = \int_{17,7}^{22} 0,34\omega(t)dt + \int_{22}^{27,5} 0,39\omega(t)dt = 0,37.$$

Следовательно, коэффициент внутреннего трения для вероятностного температурного

интервала  $-17,7 \dots -27,5$  °С будет определяться по формуле

$$f_2 = 0,35 + 0,37\rho.$$

Удельное сопротивление резанию  $K_{рез}$  для данного вероятностного температурного интервала также должно определяться системой двух корреляционных зависимостей:

$$K_{рез} = 10\rho^{-7,76\rho+3,85} \text{ для } t^0 = -4 \dots -22 \text{ °С};$$

$$K_{рез} = 10\rho^{-7,35\rho+2,55} \text{ для } t^0 \text{ ниже } -22 \text{ °С}.$$

Тогда  $K_{рез}$  для интервала температур  $-17,7 \dots -27,5$  °С будет равно

$$K_{рез} = \int_{17,7}^{22} 10\rho^{-7,76\rho+2,85} \omega(t)dt + \int_{22}^{27,5} 10\rho^{-7,35\rho+2,55} \omega(t)dt$$

или

$$K_{рез} = 4,4\rho^{-7,76\rho+2,85} + 5,6\rho^{-7,35\rho+2,55}.$$

**Таблица 1.** Корреляционные зависимости удельного усилия резания снега  $K_{рез}$  и коэффициентов  $f_1$  и  $f_2$  от параметров  $t^0$  и  $\rho$  снежного покрова

Определяемый параметр	Температурный интервал, °С	Корреляционная зависимость
Удельное усилие копания снега $K_{рез}$ , кПа	1...3,9 4...22 ниже 22	$K_{рез} = 10\rho^{-4,23\rho+1,94}$ $K_{рез} = 10\rho^{-7,76\rho+2,85}$ $K_{рез} = 10\rho^{-7,35\rho+2,55}$
Коэффициент внешнего трения снега $f_1$	1...3,9 4...7,9 8...15,9 16 ... 33	$f_1 = 0,198 - 0,3\rho$ $f_1 = 0,123 - 0,188\rho$ $f_1 = 0,135 - 0,196\rho$ $f_1 = 0,168 - 0,271\rho$
Коэффициент внутреннего трения снега $f_2$	1 ... 3,9 4 ... 22 ниже 22	$f_2 = 0,24 + 0,5\rho$ $f_2 = 0,33 + 0,34\rho$ $f_2 = 0,36 + 0,39\rho$

Результаты вычислений  $K_{рез}$ ,  $f_1$  и  $f_2$  относительно климатической зоны ВКО:

$$f_1 = 0,129 - 0,192\rho; \quad f_2 = 0,33 + 0,34\rho; \quad K_{рез} = 10\rho^{-7,76\rho+2,85}.$$

Когда различные значения случайной величины имеют одинаковые плотности вероятностей, при оценке температурных интервалов и интервалов изменения объемной массы снега действует закон равномерной плотности [6]. С помощью этого закона моделируются случайные величины и случайные процессы [5].

Числовые характеристики закона равномерной плотности вычисляются по формулам, в которых  $a$  и  $b$  – соответственно ближний и дальний пределы изменения случайной величины:

математическое ожидание  $M_{(x)} = \frac{a+b}{2}$ , дисперсия  $D_{(x)} = \frac{(b-a)^2}{2}$ .

Таким образом, исходя из положения теории вероятности и закона равномерной плотности правомерно утверждать, что математическое ожидание  $M_x$  по каждому интервалу объемной массы снега  $\rho$  и температуры воздуха  $t^0$  для всех основных климатических регионов является наиболее вероятным значением.

Для ВКО  $M_{(t)} = -8,2^0C$ ;  $M_{(\rho)} = 0,25 \text{ т/м}^3$ .

Определив с доверительной вероятностью  $P_g = 95\%$  значения величин  $\rho$  и  $t^0$ , находим соответствующие им наиболее вероятные значения параметров  $K_{рез}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  и получаем результаты окончательных вычислений для ВКО:

$$K_{рез} = 2,84; f_1 = 0,081; f_2 = 0,415.$$

#### *Заключение.*

1. Диапазон изменения величины объемной массы снега по территории Республики Казахстан составляет  $0,14 \dots 0,16 \text{ т/м}^3$ , в малоснежных районах –  $0,31 \dots 0,33 \text{ т/м}^3$ , на севере РК –  $0,36 \dots 0,4 \text{ т/м}^3$ .

2. Объемная масса снежного покрова и температура для 6 основных климатических регионов РК подчиняются закону нормального распределения с вероятностью  $P_g = 95\%$  и при уровне значимости  $\alpha = 0,1$ .

3. На основе вероятных значений температуры и объемной массы снега получены наиболее вероятные значения удельного сопротивления резанию и коэффициентов внешнего и внутреннего трения снега, являющиеся основными физико-механическими характеристиками снежного покрова для соответствующих регионов территории Республики Казахстан.

4. Определение наиболее вероятных значений параметров, характеризующих свойства снега, имеет решающее значение для расчета сопротивлений, возникающих при работе снегоуборочных машин, так как с изменением сопротивлений при взаимодействии их рабочих органов с разрабатываемым снежным массивом соответственно изменяются энергоемкость процесса разработки снега, тяговые сопротивления и производительность машин.

*Благодарности.* Материалы статьи получены при анализе известных работ по проекту АР09260192 «Разработка инновационного фрезерно-роторного снегоочистительного рабочего оборудования с повышенной эффективностью работы», финансируемого Комитетом науки МОН РК.

#### Список литературы

1. Зеленин А.Н. Резание грунтов. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – 315 с.
2. Физические методы исследования льда и снега / Под общ. ред. Богородского В.В. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 201 с.
3. Иванов А.Н., Мишин В.А. Снегоочистители отбрасывающего действия. – М.: Машиностроение, 1981. – 159 с.
4. Карабан Г.Л. Снегоуборочные машины. – М.: Изд. МКХ РСФСР, 1962. – 124 с.
5. Дудкин М.В., Молдаханов Б.А. и др. Вероятностная оценка снежного фона эксплуатации снегоочистительных машин на территории Республики Казахстан // Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева. – 2020. – №4. – С. 100-105.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –10-е изд. – Москва: Высшая школа, 2006. – 575 с.
7. Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 126 с.
8. Gaume, J., Chambon, G., Reiweger, I., van Herwijnen, A., & Schweizer, J. (2014). On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. – In ISSW proceedings. – 2014. –

Рр. 681-688.

9. Zakirov M.F., Baranchik V.P. Novyj podhod k vyboru rezhimov razrusheniya snega rabochimi organami mashin [New approach to the choice of snow destruction working parts of machines] // *Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve*. – 2011. – No 2 (18). – Pp. 107-110.
10. Баранчик В.П., Закиров М.Ф. Исследования сопротивления резанию снега малогабаритным плужным снегоочистителем // *Механизация строительства*. – 2009. – № 11. – С. 16-18.
11. Ким А.И., Гурьянов Г.А., Вавилов А.В., Бугаев А.Б., Дудкина Е.Л. Development of mounted impact-rotor working equipment for destruction of snow-ice formations // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2021. – 258 с.
12. Yosida Z. (1980) Theoretical studies on motion of snow kicked up by a snowplow // *Low Temp Sci Ser A* 35 47-65.
13. Voitkovskiy K.F., Golubev V.N., Lapteva N.I., Troshkina Ye.S., Ushakova L.A., Pavlov A.V. (1975) Mass transfer and metamorphism in snow cover // *International Association of Hydrological Sciences Publication 114 (Symposium at Grindelwald 1971 – snow Mechanics)*. – Pp. 16-24.
14. Podolskiy E.A., Chambon G., Naaim M., Gaume J. (2014) Evaluating snow weak-layer rupture parameters through inverse finite element modeling of shaking-platform experiments // *Nat Hazards Earth Syst Sci Discuss* 2(7): 4525-4580.
15. De Biagi V., Barbero M., Barpi F., Borri-Brunetto M., Podolskiy E. (2018) Failure mechanics of snow layers through image analysis // *Eur J Mech A Solids* 74: 26–33.
16. Закиров М.Ф., Баранчик В.П. Новый подход к выбору режимов разрушения снега рабочими органами машин // *Интеллектуальные системы*.
17. Алешков Д.С., Урусова Н.Ю. Влияние основных параметров фрезерно-роторного снегоочистителя на вырезаемый объем снежной стружки // *Вестник СибАДИ*. – 2013. – № 5 (33). – С.10-14.

#### References

1. A.N. Zelenin. *Rezanie gruntov*. – М.: Izd. AN SSSR, 1959. – 315 s.
2. *Fizicheskie metody issledovaniya l'da i snega*. Pod obshch. red. Bogorodskogo V.V. – L.: Gidrometeoizdat, 1975. – 201 s.
3. A.N. Ivanov, V.A. Mishin. *Snegoochistiteli otrasyvayushchego dejstviya*. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 159 s.
4. G.L. Karaban. *Snegoborochnye mashiny*. – М.: Izd. MKKH RSFSR, 1962. – 124 s.
5. M.V. Dudkin, B.A. Moldahanov i dr. Veroyatnostnaya ocenka snezhnogo fona ekspluatatsii snegoochistitel'nyh mashin na territorii Respubliki Kazahstan. *Vestnik VKTU №4, 2020*. – Ust'-Kamenogorsk, 2020. – S. 100-105.
6. E.S. Ventcel'. *Teoriya veroyatnostej*. –10-e izd. – Moskva: Vysshaya shkola, 2006. – 575 s.
7. K.F. Vojtkovskij. *Mekhanicheskie svoystva snega*. – М.: Nauka, 1977. – 126 s.
8. Gaume, J., Chambon, G., Reiweger, I., van Herwijnen, A., & Schweizer, J. (2014). On the failure criterion of weak-snow layers using the discrete element method. In *ISSW proceedings*. 2014 (pp. 681-688).
9. Zakirov M.F., Baranchik V.P. Novyjpodhod k vyboru rezhimov razrusheniya snega rabochimi organami mashin [New approach to the choice of snow destruction working parts of machines]. *Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no 2 (18), pp. 107-110.
10. Baranchik V.P., Zakirov M.F. Issledovaniya soprotivleniya rezaniyu snega malogabaritnym pluzhnym snegoochistitelem // *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2009. – № 11. – S. 16-18.
11. A.I. Kim, G.A. Gur'yanov, A.V. Vavilov, A.B. Bugaev, E.L. Dudkina. Development of mounted impact-rotor working equipment for destruction of snow-ice formations. *International Review of Mechanical Engineering*. 2021. – 258 с.
12. Yosida Z 1980 Theoretical studies on motion of snow kicked up by a snowplow *Low Temp Sci Ser A* 35 47-65.
13. Voitkovskiy K F Golubev V N Lapteva N I Troshkina Ye S Ushakova L A and Pavlov A V 1975 Mass transfer and metamorphism in snow cover *International Association of Hydrological Sciences Publication 114 (Symposium at Grindelwald 1971 – snow Mechanics)* 16–24.
14. Podolskiy EA, Chambon G, Naaim M, Gaume J (2014) Evaluating snow weak-layer rupture parameters through inverse finite element modeling of shaking-platform experiments. *Nat Hazards Earth Syst Sci Discuss* 2(7):4525–4580.
15. De Biagi V, Barbero M, Barpi F, Borri-Brunetto M, Podolskiy E (2018) Failure mechanics of snow layers through image analysis. *Eur J Mech A Solids* 74:26-33.
16. Zakirov M.F., Baranchik V.P. Novyj podhod k vyboru rezhimov razrusheniya snega rabochimi organami mashin // *Intel'ktual'nye sistem*.
17. Alshkov D.S., Urusova N.YU. Vliyanie osnovnyh parametrov frezerno-rotornogo snegoochistitelya na



vyrezaemyj ob"em snezhnoj struzhki // Vestnik SibADI. 2013. № 5 (33). S.10-14.