

УДК 621.317.3:629.95

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-526-531

**Для цитирования:** Сатышев А. С., Безбородов Ю. Н., Ганжа В. А. Измерительный преобразователь лабораторного стенда для испытания рабочих органов специальных машин аэродромно-технического обеспечения // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 3. С. 526–531. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-526-531

**For citation:** Satyshev A. S., Bezborodov Yu. N., Ganzha V. A. [Measuring converter of laboratory stand for testing working bodies of special machines of aerodrom-technical support]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 526–531 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-526-531

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН АЭРОДРОМНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А. С. Сатышев\*, Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа

Сибирский федеральный университет  
Институт нефти и газа  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82, стр. 6  
\*E-mail: satushev@gmail.com

*Проведена проектировка тензометрического измерительного преобразователя в рамках подготовки инструментальной базы для выявления зависимости силовых параметров, а именно, силы сопротивления резанию прочных снежно-ледяных образований (ПСЛО). Актуальность статьи обусловлена необходимостью выполнения программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года» и реализацией стратегии её выполнения. Это влечет за собой разработку новых рабочих органов специальных машин аэродромно-технического обеспечения, выполненных на базе дискового режущего инструмента. На этапах проектирования необходимо знать силовые параметры, действующие на рабочий орган. Описаны условия проведения лабораторных экспериментов по изучению процесса взаимодействия дискового режущего инструмента с ПСЛО. Показан процесс выбора оптимального с точки зрения необходимых деформаций места наклейки тензорезисторов и способ сборки их в измерительные мостовые схемы. Сделаны выводы о корректности подбора материала тензометрического элемента. Подтверждена гипотеза об исключении взаимного влияния измеряемых составляющих друг на друга. Получены тарировочные коэффициенты преобразования напряжения в значение силы для каждой составляющей усилия резания. Подчёркивается важность проведения тарировки измерительного преобразователя перед проведением очередного опыта. Работа является продолжением серии экспериментальных лабораторных исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с ПСЛО в течение ряда лет, проводимых в Сибирском федеральном университете.*

*Ключевые слова:* снежно-ледяные образования, дисковый режущий инструмент, силовые параметры, радиус закругления, лёд, радиус закругления рабочей кромки.

## MEASURING CONVERTER OF LABORATORY STAND FOR TESTING WORKING BODIES OF SPECIAL MACHINES OF AERODROM-TECHNICAL SUPPORT

A. S. Satyshev\*, Yu. N. Bezborodov, V. A. Ganzha

Siberian Federal University  
School of Petroleum and Natural Gas Engineering  
82/6, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: satushev@gmail.com

*In the article, within the framework of the preparation of the instrumental base for revealing the dependence of the force parameters, namely the resistance to cutting of durable snow-ice formations (DSIF), engineering of the measuring converter is accomplished. The relevance of the article is due to the need to implement the program “Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period until 2020” and the implementation of the strategy. It entails the development of the new working bodies of special machines for aerodrome-technical support, made on the basis of a disk cutting tool. At the design stages it is necessary to know the force parameters acting on the working body. The conditions for carrying out the laboratory experiments to study the process of interaction of the disk cutting tool with PSLO are described. The process of choosing the place of a strain gauge sticker from the point of view of necessary deformations and the way to assemble them into measuring bridge circuits are shown. The conclusions*

about the correctness of the selection of the material of the strain gauge element have been made. The hypothesis on exclusion of mutual influence of measured components against each other has been confirmed. The calibration coefficients for converting the voltage into a force value for each component of the cutting force have been received. The importance of calibrating the measuring converter before conducting the next experiment is emphasized. This work is a continuation of a series of work on experimental laboratory studies of the processes of interaction of a disk-cutting tool with DSIF, for a number of years, conducted at Siberian Federal University.

*Keywords:* snow-ice formations, disk cutting tool, power parameters, ice, radius of curvature of the working edge.

**Введение.** Для выполнения программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», утвержденной постановлением правительства [1], необходимо реализовать стратегию [2], согласно которой предусмотрена интеграция Арктической зоны с основными районами России посредством освоения и разработки месторождений углеводородов, цветных и драгоценных металлов, формирования современных транспортно-логистических узлов и опорной сети автомобильных дорог, развития, реконструкции и модернизации аэропортовой сети.

Это повлечет за собой необходимость содержания вновь построенных и реконструированных автомобильных дорог и аэродромов в зимний период, длительность которого в некоторых районах превышает 140 дней в году. Самые сложные и ответственные мероприятия по содержанию дорожных покрытий различного назначения направлены на разрушение и удаление снежно-ледяных образований (СЛО). Известны несколько способов борьбы со СЛО: химико-механический [3], фрикционный, тепловой, механический. Последний способ позволяет разрушать и удалять СЛО с дорожных покрытий, не нанося вреда окружающей среде, а также экономить на химических реагентах, топливе и сохранять целостность дорожного полотна. Это закрепляет за механическим способом первенство в разработке и проектировании новых рабочих органов специальных машин.

Однако существует ниша, в которой данный способ является малоэффективным – это удаление прочных снежно-ледяных образований (ПСЛО), что обусловлено их физико-механическими свойствами: плотность  $\rho = 0,6\text{--}0,9$  г/см<sup>3</sup>; предел прочности на сжатие  $\sigma = 2,5\text{--}2,8$  МПа; толщина слоя  $h \leq 100$  мм; температура исследуемой среды  $-2\text{--}10$  °С. Существующие рабочие органы или не приспособлены для их разрушения, или делают это малоэффективно. Для повышения производительности и снижения энергоемкости при удалении ПСЛО предложено применение дискового режущего инструмента [4–6]. Однако с применением дискового режущего инструмента встает вопрос создания высокоэффективных рабочих органов, на стадии проектирования которых необходимо знать силовые параметры. Величина их зависит от множества факторов, например, таких как скорость резания, геометрические параметры инструмента, температура окружающей среды и разрушаемого материала, степень износа, обусловленная величиной радиуса закругления рабочей кромки.

**Условия проведения эксперимента.** Для более объективного изучения процесса взаимодействия дискового инструмента с ПСЛО предлагается контро-

лировать три составляющие силы резания: горизонтальную, боковую и вертикальную. Контроль непосредственно на рабочем органе малоэффективен, так как требует больших трудозатрат и дорогостоящего оборудования (датчики силы, оснастка для их монтажа); кроме того, невозможно изолировать влияние температуры окружающей среды, влажности, теплозапаса дорожного полотна и других факторов друг на друга; постоянно меняются физико-механические свойства ПСЛО. Поэтому, опираясь на результаты работ [7–10] по резанию мерзлых грунтов различными инструментами, целесообразно исследовать процесс взаимодействия полноразмерного дискового режущего инструмента (рис. 1), имеющего различный радиус закругления рабочей кромки, с разрушаемым массивом путем стендовых испытаний в лабораторных условиях.

Во время проведения экспериментальных исследований использовались дисковые резцы с различным радиусом закругления рабочей кромки  $R = [0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5]$  мм. Данный диапазон значений обусловлен результатами исследований изнашивания режущей кромки, проведенными в работе [8]. Скорость резания 0,51 м/с (1,84 км/ч). Температура окружающего воздуха  $-2\text{--}7$  °С. Остальные параметры дискового режущего инструмента приняты следующими: диаметр  $D = 200$  мм, угол заострения  $\delta = 30^\circ$ ; глубина резания  $h = 60$  мм; шаг резания  $t = [10; 20; 30; 40; 50]$  мм; задний угол  $\gamma = 3^\circ\text{--}5^\circ$ ; материал – термообработанная сталь 40ХН (HRC 52–54) [11]. Для проведения эксперимента использовался механизированный лабораторный стенд, описанный в работе [12], конструкция которого защищена патентом на изобретение № 2429459 [13]. Для фиксирования и записи информации применен измерительный комплекс, описанный в статье [14].

**Тензометрический измерительный элемент.** Тензометрическая балка представляет собой тонкостенный цилиндр (рис. 2) с прямоугольным основанием, служащим креплением к лабораторному стенду.

Изделие выполнено из стали марки 50ХФА [11]. При её нагружении происходит упругая деформация, на которую реагируют наклеенные на поверхность балки тензорезистивные элементы (2ФКПА 20 200 ГВ). На рис. 2 приведена схема наклейки чувствительных элементов.

Размещение тензорезисторов в зонах стабильных деформаций обеспечивает интенсивное растяжение и сжатие нитей чувствительных решеток, достаточное для получения стабильных сигналов на выходе полумостовых (мостовых) схем. Такое размещение тензорезисторов способствует и повышению общей чувствительности тензометрического элемента.

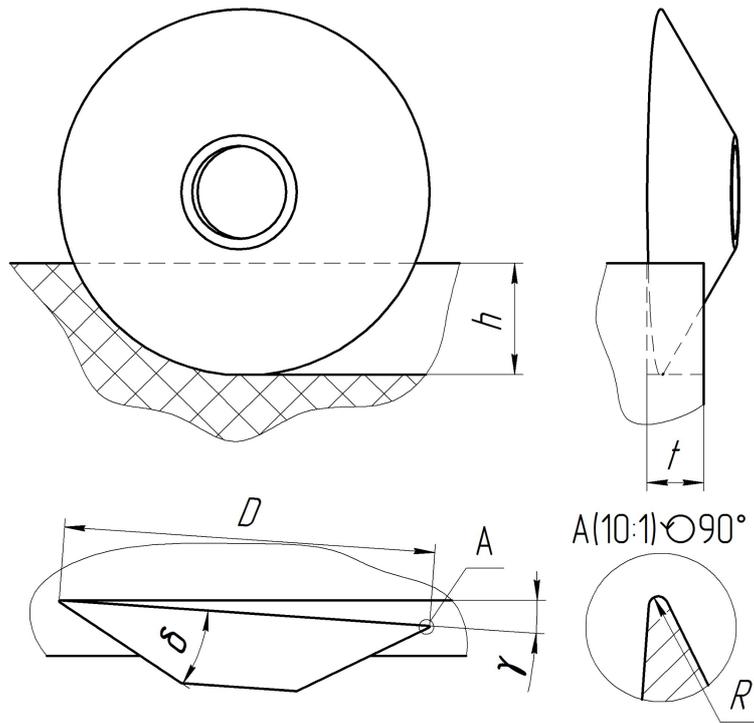


Рис. 1. Схема взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемым массивом:  
 $R$  – радиус закругления рабочей кромки;  $t$  – шаг резания;  $D$  – диаметр дискового  
 реза;  $\delta$  – угол заострения;  $h$  – глубина резания;  $\gamma$  – задний угол

Fig. 1. Scheme of interaction of a disk cutting tool with a destructible array:  
 $R$  – working edge radius of curvature;  $t$  – cutting step;  $D$  – diameter of the disk cutter;  
 $\delta$  – wedge angle;  $h$  – depth of cut;  $\gamma$  – clearance

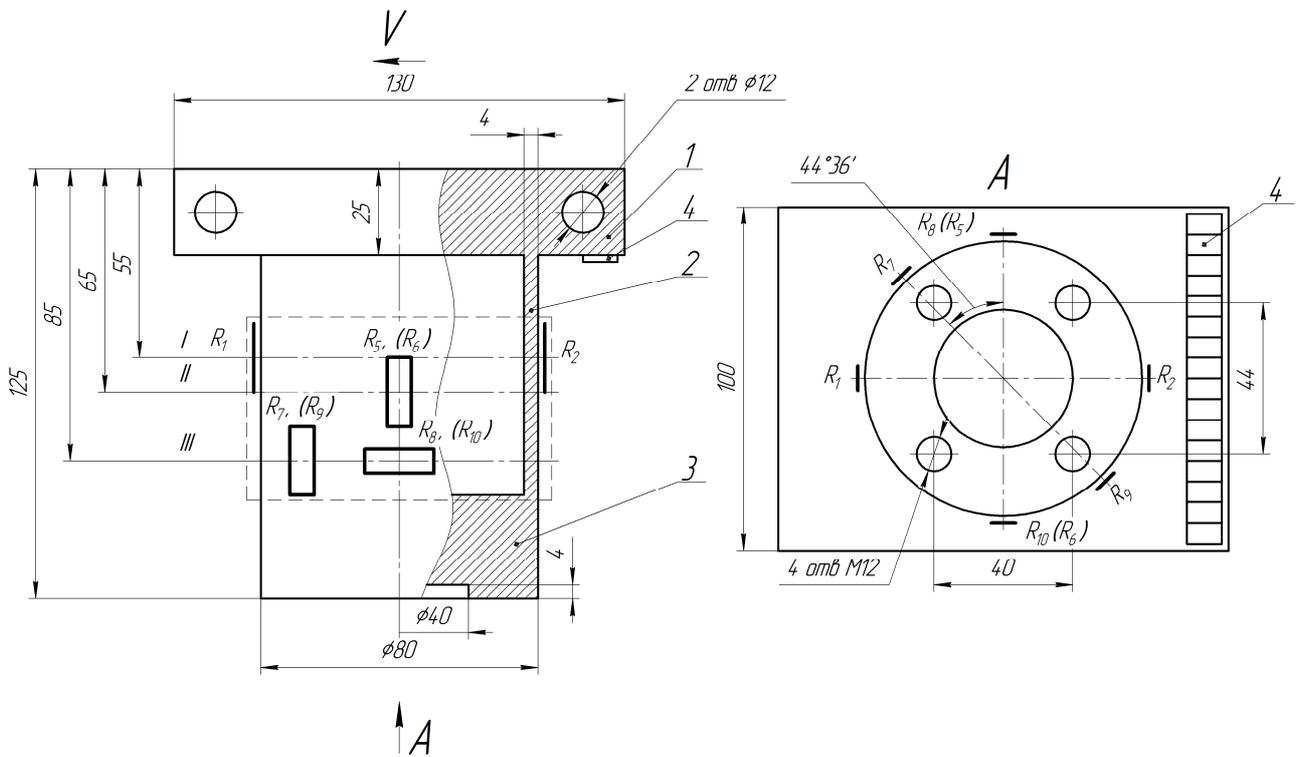


Рис. 2. Чертеж тензометрического измерительного элемента

Fig. 2. The draft of the strain gauge element

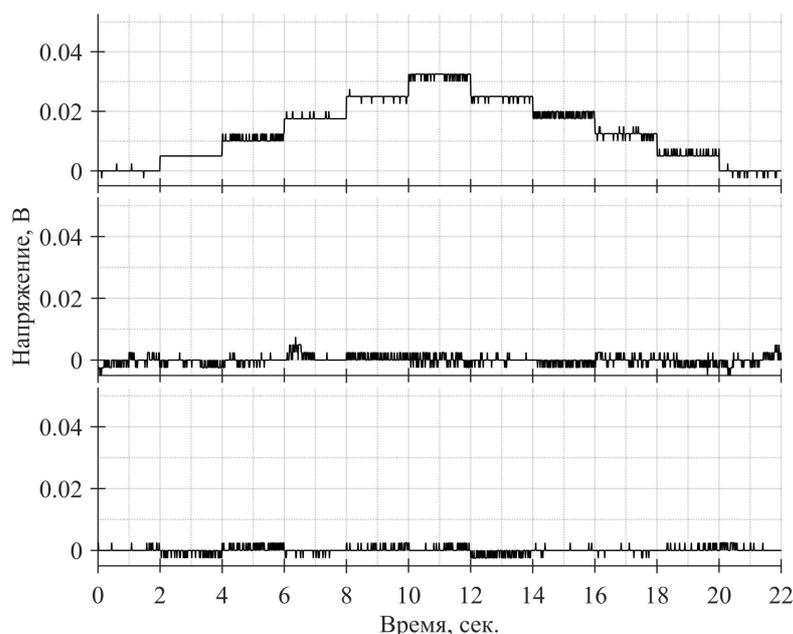


Рис. 3. Диаграмма переходных процессов при тарировании горизонтальной составляющей усилия резания:  
сверху вниз: горизонтальная, боковая, вертикальная составляющая усилия резания

Fig. 3. The diagram of transients during horizontal force component calibration  
Top down: horizontal, lateral, vertical component of the cutting force

Для измерения горизонтальной составляющей приложенного усилия используется полумостовая схема включения с избирательной чувствительностью, тензорезистор  $R_1$  включён в первое плечо измерительного моста, а  $R_2$  – в четвёртое.

Такая схема позволяет обеспечить избирательную чувствительность тензометрического моста к деформации изгиба, возникающей вследствие действия боковой составляющей приложенного усилия, и не чувствительна к деформации растяжения-сжатия, возникающей вследствие действия вертикальной составляющей. Для боковой составляющей используется схема включения тензорезисторов, аналогичная приведённой выше. Тензорезистор  $R_5$  включён в первое плечо измерительного моста, а  $R_6$  – в четвёртое. Для измерения вертикальной составляющей диаметрально расположенные тензорезисторы  $R_7$  и  $R_9$  необходимо включить в одно плечо полумоста. Во второе плечо включаются компенсационные тензорезисторы  $R_8$  и  $R_{10}$ . Все схемы включения обеспечивают термокомпенсацию и компенсацию сопротивления соединительных проводов.

**Тарирование тензометрического элемента.** Для тарирования тензометрического элемента, описанного выше, применяется стенд, конструкция которого защищена патентом на изобретение № 2500983 [15], позволяющий закреплять элемент в различных пространственных положениях и, соответственно, создавать требуемый вектор нагрузки. Тарирование производилось с помощью одного измерительного прибора для всех составляющих – динамометра растяжения ДПУ-5-2 5033 второго класса точности. Для нагружения элемента использовался талреп и вспомогательная оснастка.

Нагрузка элемента осуществлялась ступенчато, с шагом 500 Н, до предельного значения в 2 500 Н. Разгрузка производилась с тем же шагом до нулевого значения. На рис. 3 приведена диаграмма переходных процессов, возникающих во время тарирования.

На графике горизонтальной составляющей (рис. 3) видно ступенчатое изменение напряжения и его постоянная величина для каждой из ступеней. Для графика боковой и вертикальной составляющей однозначно прослеживается «нулевое» значение, что в свою очередь подтверждает правильность наклейки тензорезисторов и утверждение об исключении взаимного влияния различных составляющих друг на друга. Диаграммы переходных процессов при тарировании боковой и горизонтальной составляющей усилия резания аналогичны приведенной выше.

Для сопоставления значения напряжения к приложенному усилию исходные данные поблочко (один блок длительностью 2 с) подвергались обработке, результаты которой приведены в таблице.

Благодаря данным результатам удалось построить графическую зависимость (рис. 4), отражающую отношение значения составляющих силы, прилагаемой к тензометрическому элементу, и напряжения, полученного с тензометрического усилителя.

Из графиков отчетливо видна линейная зависимость горизонтальной, боковой и вертикальной составляющей усилия резания от напряжения. Для каждого графика 1, 5, 9 (рис. 4) вычислим коэффициент линии тренда, проходящей через начало координат 80 074,568 Н/В, 140 953,396 Н/В, 51 338,284 Н/В для горизонтальной, боковой и вертикальной составляющей усилия резания соответственно. Эти значения и будут являться тарировочными коэффициентами.

**Зависимость напряжения на каналах оцифровки от приложенной силы в процессе тарирования горизонтальной составляющей усилия резания**

Сила, Н	Канал измерения		
	горизонтальный, мВ	боковой, мВ	вертикальный, мВ
0	0,0687	0,175	0,325
500	5,19	0,769	0,406
1 000	11,5	0,212	0,456
1 500	18,2	0,919	0,106
2 000	24,9	0,438	0,787
2 500	32,1	0,25	0,412

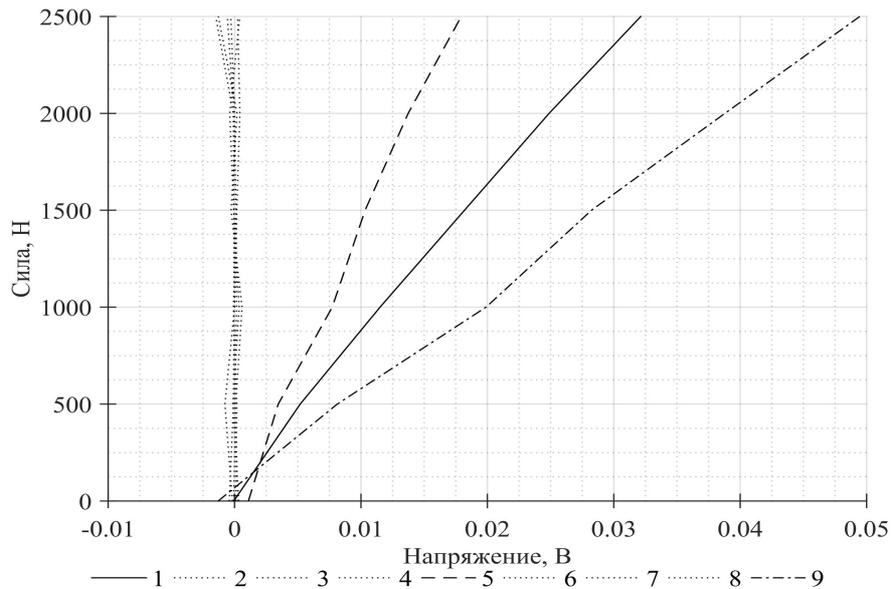


Рис. 4. Графики тарирования тензометрического звена:

1, 2, 3 – горизонтальная, боковая, вертикальная составляющие усилия резания соответственно при тарировании горизонтальной составляющей; 4, 5, 6 – аналогично при тарировании боковой составляющей; 7, 8, 9 – аналогично при тарировании вертикальной составляющей

Fig. 4. Graphs of gauging of strain gauge element:

1, 2, 3 – horizontal, lateral, vertical component of the cutting force under gauging of lateral component; 4, 5, 6 – identical under gauging of lateral component; 7, 8, 9 – identical under gauging of vertical component

**Заключение.** Тарирование измерительного преобразователя является одним из важнейших факторов успешности проведения экспериментальных лабораторных исследований. Известно, что на показания тензометрического элемента может оказывать влияние множество различных переменных факторов, например, электромагнитные поля, сопротивление проводов, температура окружающей среды и т. д. Выявление таких влияний на этапе тарирования позволяет или полностью их устранить (например, изменением конструкции тензометрического элемента), или заложить их учет в тарировочные коэффициенты. Это, в свою очередь, сказывается на данных, полученных в ходе экспериментальных исследований. Тарирование следует проводить перед каждой серией опытов. Также перед каждым тарированием рекомендуется проводить тренировку измерительного преобразователя загрузкой и разгрузкой несколько раз, без фиксации получаемых данных. Это обеспечит наибольшую достоверность получаемых данных. Также в процессе тарирования измерительного преобразователя могут

быть выявлены сбои в его работе, поломки, что позволит своевременно их устранить и обеспечить целостность экспериментальных данных.

#### Библиографические ссылки

1. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года»: Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 г. № 366 : в ред. от 17.12.2014. 36 с.
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года : утв. Президентом РФ 08.02.13 г. Пр232. 11 с.
3. Kime J. A. Method and apparatus for depositing snow-ice treatment material on pavement. US 6,446,879 B1. Sep. 10. 2002.
4. Дисковый режущий инструмент для разрушения снежно-ледяных образований / В. А. Ганжа [и др.] //

Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. № 2. С. 34–37.

5. Разрушение прочных снежно-ледяных образований / В. А. Ганжа [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 3.

6. Пат. 2487970 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> E 01 H 5/12. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / Ганжа В. А. [и др.] (Рос. Федерация); заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». № 2012109412/13; заявл. 10.03.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

7. Желукевич Р. Б. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом: монография / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2012. 196 с.

8. Барон Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами: разрушение тангенциальными инструментами. М.: Наука, 1973. 172 с.

9. Барон Л. И., Глатман Л. Б., Загорский С. Л. Разрушение горных пород проходческими комбайнами: разрушение шарошками. М.: Наука, 1969. 146 с.

10. Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами: монография. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.

11. Третьяков А. В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании: справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. М.: Машиностроение, 1971. 64 с.

12. Модернизация стенда для испытания режущего инструмента рабочих органов строительных и дорожных машин / В. Г. Шрам [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 78–80.

13. Пат. 2429459 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 M 13/00. Стенд для испытания рабочих органов землеройных машин / Ганжа В. А., Желукевич Р. Б., Безбородов Ю. Н. (Рос. Федерация); заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». № 2010116560/28; заявл. 26.04.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26.

14. Измерительный комплекс для контроля силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом / А. С. Сатышев [и др.] // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. Л. И. Сучковой. Барнаул, 2016. С. 155–158.

15. Пат. 2500983 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 B 7/16. Стенд для градуировки тензоэлементов / Ганжа В. А. [и др.] (Рос. Федерация); заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». № 2012121697/28; заявл. 25.05.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

## References

1. Decree of the Government RF of 21.04.2014 № 366 (ed. from 17.12.2014) “Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period until 2020” (In Russ.).

2. Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for

the period until 2020 approved by the President of the Russian Federation 08.02.13 order 232.

3. Kime J. A. Method and apparatus for depositing snow-ice treatment material on pavement, US 6,446,879 B1, Sep. 10, 2002.

4. Ganzha V. A., Bezborodov Yu. N., Zhelukevich R. B., Malysheva N. N., Kovalevich P. V. [The disk blade for destruction of snow-ice formation]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2012, Vol. 3, P. 34–37 (In Russ.).

5. Ganzha V. A., Bezborodov Yu. N., Kovalevich P. V., Kaptyuk I. V. [Breaking the strong snow and ice formations]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2015, Vol. 3, P. 21–23 (In Russ.).

6. Ganzha V. A. *Rabochii organ dlya udaleniya snezhno-ledyanogo nakata s poverkhnosti dorog i aerodromov* [Working body for removal of snow-ice run from the surface of roads and aerodromes]. Patent RF, No. 2487970, 2012.

7. Zhelukevich R. B. *Razrabotka merzlykh gruntov zemleroinymi mashi nami s diskovym instrumentom* [The excavating of frozen soils by digging machines with a disk tool]. Krasnoyarsk, Sib. Fed. Univ. Publ., 2012, 196 p.

8. Baron L. I. *Razrushenie gornyykh porod prokhodcheskimi kombainami*. *Razrushenie tangentsial'nymi instrumentami* [Destruction of rocks by tunneling combines: Destruction by tangential tools]. Moscow, Nauka Publ. 1973, 172 p.

9. Baron L. I., Glatman L. B., Zagorskii S. L. *Razrushenie gornyykh porod prokhodcheskimi kombainami*. *Razrushenie sharoshkami* [Destruction of rocks by tunneling combines: Destruction by disc tools]. Moscow, Nauka Publ. 1969, 146 p.

10. Zelenin A. N. *Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami* [Ground breaking principles by mechanical means]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 1968, 376 p.

11. Tret'yakov A. V., Trofimov G. K., Gur'yanova M. K. *Mekhanicheskie svoystva staley i splavov pri plasticheskom deformirovanii* [Mechanical properties of steels and alloys during plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 64 p.

12. Shram V. G., Ganzha V. A., Kovalevich P. V., Karpov I. S. [Modernization of the bench for testing cutting tools of working bodies of construction and road machinery]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013, Vol. 3, P. 78–80 (In Russ.).

13. Ganzha V. A. *Stend dlya ispytaniya rabochikh organov zemleroinykh mashin* [Test bench for working bodies of excavating machines]. Patent RF, No. 2429459, 2010.

14. Satyshev A. S., Ganzha V. A., Kovalevich P. V., Kaptyuk I. V., Panchenko I. V. [Measuring complex for controlling the resistance force of snow-ice formations by cutting a disk tool]. *Izmerenie, kontrol', informatizatsiya*. [Measurement, control, informatization]. Barnaul, 2016, P. 155–158 (In Russ.).

15. Ganzha V. A. *Stend dlya graduirovki tenzoelementov* [Stand for the calibration of strain gauges]. Patent RF, No. 2500983, 2012.

© Сатышев А. С., Безбородов Ю. Н., Ганжа В. А., 2018