

В. С. Ратушняк

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕД, НАМОРОЖЕННЫЙ НА ПРОВОД ЛЭП

V. S. Ratushnyak

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT ON ICE, FROZEN ON POWER LINES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При решении задачи освобождения ЛЭП от обледенения механическим стряхиванием может быть использовано явление хрупкости льда при высоких скоростях нагружения. Объектом исследования является трубка льда, намороженная на провод ЛЭП. Целью работы является выявление зависимости энергии, необходимой для разрушения льда, от скорости удара и проверка предположения о том, что при увеличении скорости динамического воздействия на разрушение льда требуется меньше энергии. **Материалы и методы.** Исследование выполнено с применением разработанной лабораторной установки. Удары по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе до начала обледенения, совершались с помощью маятника длиной 2 м со сменной массой груза. **Результаты.** Сформулирован критерий, позволяющий однозначно определить параметры удара, необходимого для разрушения льда. Приведены зависимости запасенной и переданной энергии от скорости ударяющего тела с учетом того, что удар является частично упругим. **Выводы.** Подтверждено предположение о снижении энергии, необходимой для образования трещин и стряхивания льда при увеличении скорости динамического воздействия по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе.

A b s t r a c t. Background. When solving the problem of freeing power lines from icing by mechanical shaking, the phenomenon of ice brittleness at high loading speeds can be used. The object of study is an ice tube frozen on a power line wire. The aim of this work is to identify the dependence of the energy required for ice destruction on the speed of impact and to verify the assumption that with an increase in the speed of the dynamic effect on ice destruction, less energy is required. **Materials and methods.** The study was performed using the developed laboratory setup. The blows on the chipper fixed directly to the wire before the icing began were carried out using a pendulum 2 m long with a removable mass of cargo. **Results.** A criterion is formulated that makes it possible to uniquely determine the parameters of the impact necessary for the destruction of ice. The dependences of the stored and transferred energy on the velocity of the striking body are given, taking into account that the shock is not completely elastic. **Conclusions.** The assumption of a decrease in the energy required for the formation of cracks and shaking off of ice with an increase in the speed of dynamic action along the chipper fixed directly to the wire is confirmed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: обледенение проводов ЛЭП, хрупкое разрушение льда, энергия для разрушения льда, критерий разрушения, частично упругий удар.

K e y w o r d s: icing of power line wires, brittle destruction of ice, energy for ice destruction, destruction criterion, partially elastic impact.

Проблема образования льда на конструкциях, сооружениях, дорожных покрытиях и поиск способов борьбы с этим природным явлением привели к тому, что на сегодняшний день накоплены обширные знания, подкрепленные теоретическими и экспериментальными исследованиями в области физико-механических характеристик льда, а также характера, параметров и условий его деформации. Известно, что на разрушение льда влияют такие факторы, как температура, наличие сдвиговых напряжений [1], скорость удара [2–4]. Малая скорость нагружения вызывает лишь упругие деформации. При возрастании скорости удара наблюдаются упругопластические деформации, и наконец, наступает хрупкое разрушение [5]. Эксперименты показывают, что прочность льда при хрупком разрушении в 4–6 раз меньше, чем при пластическом [6]. Это объясняется тем, что при медленном воздействии нагрузка успевает распределиться по большему объему льда, за счет чего его номинальная прочность возрастает. Согласно исследованиям [7–12], переход от пластического разрушения льда к хрупкому происходит на скорости деформации около 10^{-3} с^{-1} , а предельная скорость, при которой уже происходит деформация льда, составляет порядка 1 с^{-1} [13].

Среди методов освобождения проводов ЛЭП от ледовых наростов наиболее перспективными считаются те, которые реализуют механическое стряхивание льда [13, 14]. В свою очередь, основным механизмом разрушения льда при низких температурах является образование и распространение хрупких трещин [4]. Опытные данные [15, 16] показывают снижение прочности льда при увеличении скорости деформации при хрупком разрушении. Физически это объясняется нехваткой времени для развития зоны вязко-пластической деформации и релаксации напряжений в вершинах трещин [17]. Поскольку при хрупком разрушении энергия не рассеивается на пластическую деформацию, следовательно, сокращая время удара, можно снизить энергозатраты на освобождение проводов ЛЭП ото льда. Таким образом, именно высокоскоростное воздействие представляет практический интерес для решения проблемы обледенения проводов ЛЭП, а устройство, способное обеспечивать достаточные скорости удара, может оказаться эффективным.

Авторами статьи ведется разработка устройства [18–22], позволяющего сообщать на провод динамические воздействия задаваемой мощности. Контролируемость параметров удара обеспечит электрическая схема разрядного блока. В связи с этим важнейшей задачей является определение параметров механического импульса, способного преодолеть адгезионные силы льда к проводу. Целью настоящего исследования являлось выявление зависимости энергии, необходимой для разрушения льда от скорости удара и проверка предположения о том, что при увеличении скорости динамического воздействия на разрушение льда требуется меньше энергии.

Определение критерия разрушения льда

В ходе исследования использовалась установка, описанная в работе [23]. На платформе установки закреплялись образцы провода АС120/19 длиной 0,5 м с замороженной трубкой льда двух типов (табл. 1). Концы провода жестко фиксировались и с помощью маятника осуществлялся удар по отбойнику, заранее закрепленному на проводе. Фиксация отбойника до начала обледенения обеспечивала нанесение удара непосредственно на провод. Доступный диапазон высот для поднятия груза – до 2 м. Эксперимент проводился при температуре льда $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 1

Типы льда на образцах проводов АС120/19

Тип льда	Длина трубки льда, м	Диаметр льда, мм	Толщина стенки льда, мм	Масса льда, кг	Плотность льда, $\text{кг}/\text{м}^3$
1	0,36	23,5	4,15	0,0867	954,49
2	0,36	33,4	9,1	0,2387	954,49

Критерием разрушения льда было выбрано состояние, при котором лед откалывается от провода в радиусе 5–10 см от отбойника, и энергии хватает на стряхивание отколовшейся

массы льда, при этом на проводе может оставаться тонкая ледяная корка толщиной 1–2 мм. В ходе экспериментов стало известно, что при одной и той же массе груза и высоте поднятия степень разрушения льда может сильно варьироваться: от мелких трещин до полного стряхивания в соответствии с критерием разрушения. В связи с этим критерий разрушения был уточнен оговоркой: энергия груза m , поднятого на высоту h , считается необходимой и достаточной для разрушения ледяной корки диаметром d , если результат отбития соответствует критерию разрушения с вероятностью 50 %. Для проверки соответствия критерию на искомым высотах было проведено по 10 экспериментов. В качестве подтверждения малости диапазона высот, в которых выполняется критерий разрушения, было проведено по 10 экспериментов на соседних высотах, составляющих ± 5 см от найденной высоты. Полученные данные подтвердили предположение о том, что уточненный критерий позволяет однозначно определить параметры удара, необходимого для разрушения льда.

Зависимость массы груза маятника от высоты его поднятия

В результате для обоих типов льда опытным путем определены высоты поднятия четырех грузов с различной массой. Таким образом, получены восемь сценариев разрушения льда (табл. 2).

Таблица 2

Сценарии разрушения льда

Вариант сценария	Тип образца льда	Масса груза, кг	Высота поднятия, м
1	1	0,0910	1,475
2	2		1,775
3	1	0,1095	1,150
4	2		1,400
5	1	0,1580	0,650
6	2		0,875
7	1	0,2225	0,425
8	2		0,600

На рис. 1 приведен график зависимости массы груза от высоты, на которую его необходимо поднять для растрескивания и откалывания льда в соответствии с уточненным критерием разрушения. Данная зависимость носит нелинейный характер для обеих толщин льда и может быть аппроксимирована логарифмическим уравнением.

На рис. 2 приведены фотографии характерных результатов удара по отбойнику, соответствующих выбранному критерию отбития для каждого из сценариев разрушения льда.

Определение зависимости запасенной и переданной энергии от скорости удара

Когда маятник в нижней точке ударяется об отбойник, проводу передается только часть энергии. В предыдущей статье [23] для упрощения расчетов мы считали удар маятника по отбойнику приближенным к абсолютно упругому. Однако за счет диссипативных сил происходит рассеивание энергии при ударе. Для расчета количества энергии, переданной проводу, он был заменен маятником с эквивалентной массой и экспериментально определена высота его максимального отклонения при ударе. Такая замена обусловлена особенностями экспериментальной установки: вследствие того, что нить маятника является нежесткой, ударяющий маятник после столкновения отскакивает в смещенной плоскости. Сам провод за счет закрепления не имеет степеней свободы, в связи с чем по его отклонению нельзя судить о количестве переданной энергии. Поэтому вместо провода установлен второй маятник, на котором подвешено тело, сопоставимое с массой провода со льдом, выполненное из того же материала, что и отбойник на проводе (стали). Сила трения при движении маятника вокруг оси минимизирована, масса жесткого нерастяжимого стержня мала по сравнению с массой тела маятника. За маятником расположено рабочее поле с нанесенной координатной сеткой. Таким образом, были получены высоты отклонения второго маятника при ударе и рассчитано количество переданной энергии (табл. 3).

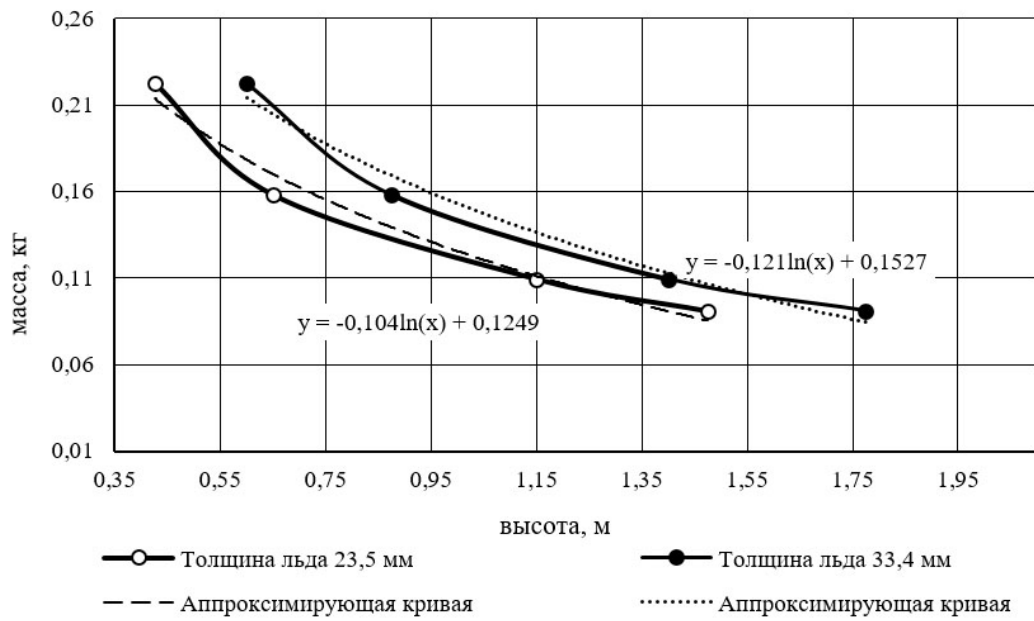


Рис. 1. Зависимость массы груза от высоты его поднятия

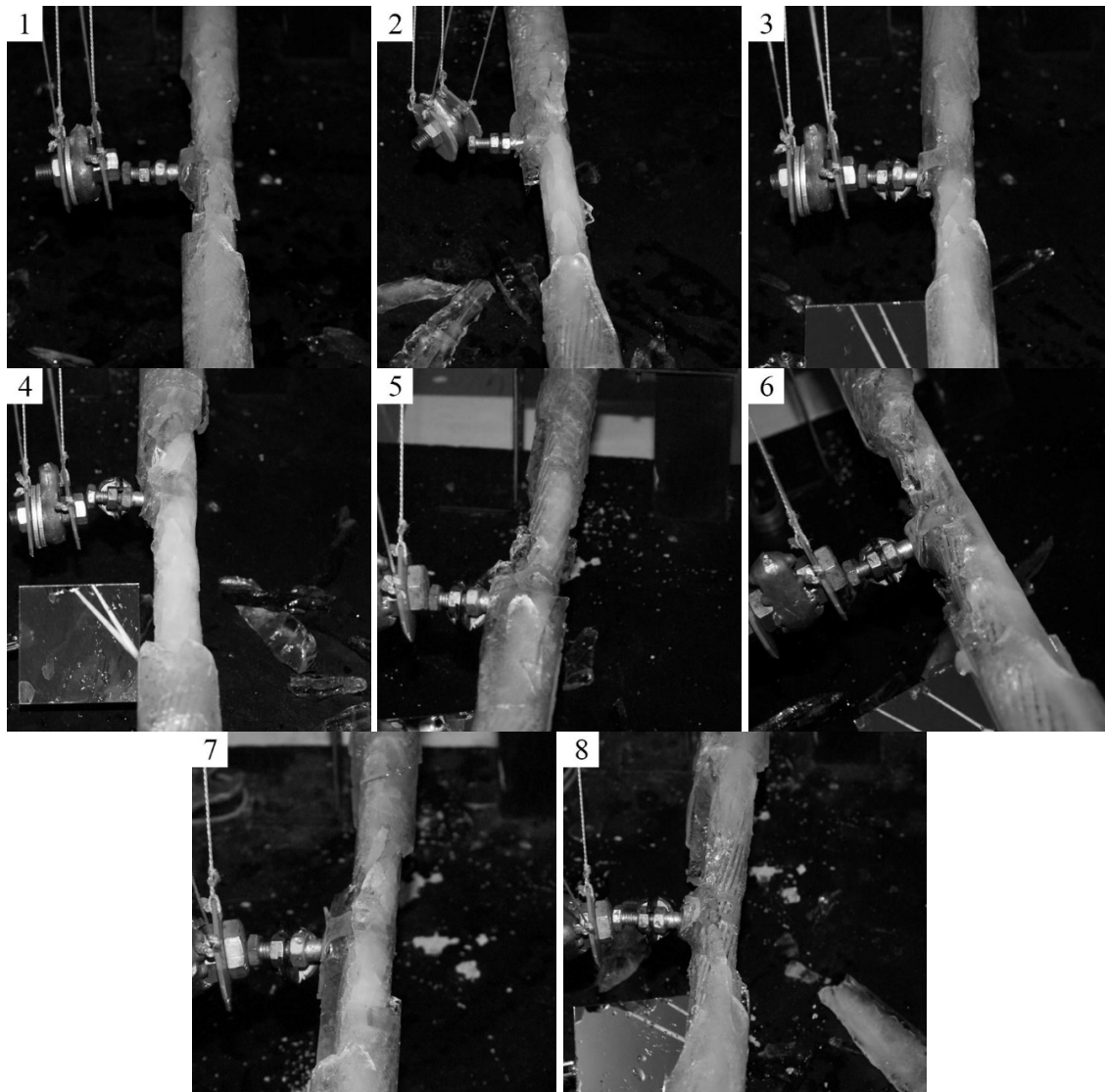


Рис. 2. Сценарии удара по проводу, соответствующие критерию разрушения

Таблица 3

Параметры и результаты испытаний

Вариант сценария	Скорость груза в нижней точке, м/с	Высота отклонения второго маятника, м	Запасенная энергия, Дж	Переданная энергия, Дж	Эффективность передачи энергии, $E_{II}/E_3 \cdot 100 \%$
1	5,379	$23,86 \cdot 10^{-3}$	1,316	0,169	12,9
2	5,900	$27,25 \cdot 10^{-3}$	1,584	0,194	12,2
3	4,749	$25,39 \cdot 10^{-3}$	1,235	0,181	14,6
4	5,240	$34,13 \cdot 10^{-3}$	1,503	0,243	16,1
5	3,571	$36,74 \cdot 10^{-3}$	1,007	0,261	25,9
6	4,143	$53,97 \cdot 10^{-3}$	1,356	0,384	28,3
7	2,888	$48,08 \cdot 10^{-3}$	0,927	0,342	36,9
8	3,430	$66,43 \cdot 10^{-3}$	1,309	0,361	36,1

На рис. 3 приведены графики зависимости запасенной и переданной энергии от скорости ударяющего тела с учетом того, что удар является частично упругим.

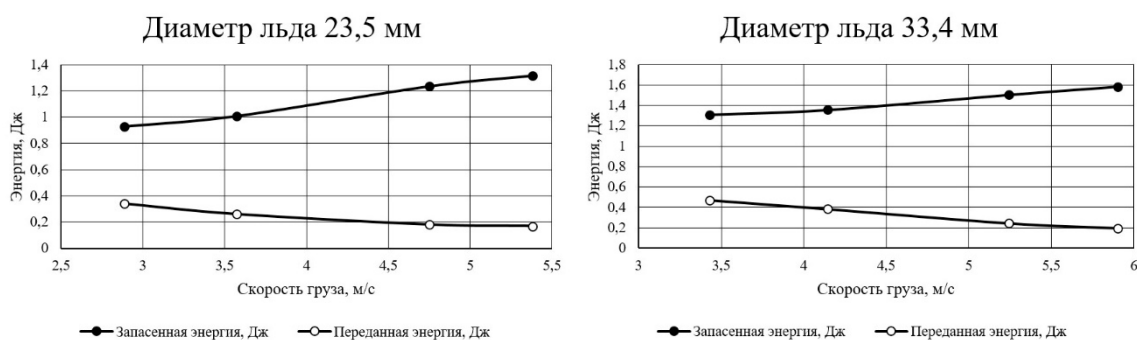


Рис. 3. Графики зависимости запасенной и переданной энергии от скорости удара

В отличие от случая, когда мы считали удар абсолютно упругим, и с ростом запасенной энергии и скорости удара количество переданной проводу энергии незначительно возрастало [23], в случае частично упругого удара с ростом скорости удара происходит обратное пропорциональное снижение количества энергии, требуемой для разрушения льда. В то же время наблюдается повышение эффективности передачи энергии с 12 до 36 % с увеличением массы ударника. Таким образом, из эксперимента мы видим, что коэффициент передачи зависит не только от материала соударяющихся тел, но и от скорости ударяющего тела и его массы. Так, при выстреле пульей, масса которой (0,49 г) значительно меньше масс грузов, используемых в эксперименте, а кинетическая энергия при ударе значительно выше (8,5 Дж), эффективность передачи энергии составляет менее 0,1 %. Такой энергии, сообщенной проводу, недостаточно даже для образования трещин во льду.

Заключение

Таким образом, впервые проведены исследования реакции ледяной трубки, намерзшей на провод при ударе по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе до начала обледенения. Сформулирован критерий разрушения ледяного нароста, позволяющий однозначно определять необходимую и достаточную энергию для растрескивания и сброса льда в радиусе 5–10 см от места удара. Исследования проведены с помощью маятника в диапазоне скоростей 3–5 м/с. Подтверждено предположение о снижении количества энергии, требуемой на разрушение льда с ростом скорости удара. Наилучшая эффективность передачи энергии ожидается при равенстве масс ударяющего и ударяемого тел, что в совокупности с высокими скоростями воздействия на обледеневший провод является целевыми параметрами разрабатываемого противообледенительного устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90188.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90188.

Библиографический список

1. *Гольдштейн, Р. В.* Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций / Р. В. Гольдштейн, В. П. Епифанов // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Математика, механика, информатика. – 2012. – Т. 12, вып. 4. – С. 21–40.
2. *Осташев, Н. А.* Зависимость деформации материалов от времени воздействия нагрузки и скорости ее приложения / Н. А. Осташев ; ред. И. А. Рохлин. – Киев : Изд-во Академии архитектуры Украинской ССР, 1954. – 35 с.
3. *Карташкин, Б. Д.* Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда / Б. Д. Карташкин // Труды ЦАГИ. – 1947. – № 607. – 42 с.
4. *Мельникова, Н. А.* Численное моделирование деформирования и разрушения анизотропных сред (на примере озерного льда) : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Мельникова Н. А. – Томск, 2010. – 165 с.
5. *Бычковский, Н. Н.* Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н. Н. Бычковский, Ю. А. Гурьянов. – Саратов : СГТУ, 2005. – 258 с.
6. Физика океана / В. В. Богородский, А. В. Гусев, Ю. П. Доронин, Л. Н. Кузнецова, К. С. Шифрин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.
7. Физика и механика льда : пер. с англ. / под ред. П. Трюде. – Москва : Мир, 1983. – 352 с.
8. *Лобанов, В. А.* Моделирование льда в задачах с конечно-элементной постановкой / В. А. Лобанов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2008. – № 4.
9. *Мельникова, Г. В.* Математическое моделирование повреждений рабочих лопаток вентиляторов при попадании льда / Г. В. Мельникова, В. С. Мацаренко, Н. Н. Серебряков // Труды ЦИАМ № 1344: Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. – Москва : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – С. 107–118.
10. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond, B. Lamarche, D. Bouchard, B. Panaroni, M. Hamel // The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures. – Canada, 2005. – P. 399–404.
11. *Богородский, В. В.* Разрушение льда. Методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.
12. Вопросы ледотехники : сб. ст. / под ред. К. Н. Коржавина. – Новосибирск, 1958.
13. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces / K. Ji, X. Rui, L. Li, A. Leblond, G. McClure // Computers & Structures. – 2015. – № 157. – P. 153–164.
14. *Сухоруков, С. И.* Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП : дис. ... канд. техн. наук / Сухоруков С. И. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 220 с.
15. *Доронин, Ю. П.* Морской лед / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
16. *Коржавин, К. Н.* Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962. – 224 с.
17. *Вершинин, С. А.* Разрушение и деформации морских ледяных полей, взаимодействующих с объектами континентального шельфа : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Вершинин С. А. – Москва, 1984. – 408 с.
18. *Ратушняк, В. С.* Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП / В. С. Ратушняк // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 102–111.
19. Пат. 2666754 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи / Ратушняк В. С., Юрьев А. В., Ильин Е. С., Трухина И. С., Ратушняк В. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017136405; заявл.16.10.2017; опубл.12.09.2018, Бюл. № 26.
20. Пат. 2666225 Российская Федерация, МПК Н 03 Л 3/53. Генератор импульсных токов для высоковольтных электрогидравлических технологий / Ратушняк В. С., Гаранин А. Е., Юрьев А. В., Ильин Е. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017123323; заявл.03.07.2017; опубл.06.09.2018, Бюл. № 25.
21. *Сергиенко, Т. А.* Аппаратный комплекс по удалению наледи с водостоков и карнизов зданий электроимпульсным способом / Т. А. Сергиенко, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк, А. В. Юрьев // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : сб. науч. тр. – Красноярск : КриЖТ ИрГУПС, 2015. – Т. 1. – С. 72–75.

22. Iljin, E. S. Experience in the magnetic pulse installation model use to clean the gondola car from the frosted and packed cargo / E. S. Iljin, O. Yu. Vakhrusheva, V. S. Ratushnyak, A. V. Yur'ev // VI International symposium on innovation and sustainability of modern railway. – Irkutsk, 2018. – P. 237–245.
23. Ратушняк, В. С. Метод экспериментального исследования ударного воздействия на провод ЛЭП / В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк // Computational nanotechnology. – 2019. – № 2. – С. 33–38.

References

1. Gol'dshteyn R. V., Epifanov V. P. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Matematika, mekhanika, informatika* [Bulletin of Novosibirsk state University. Ser.: Mathematics, mechanics, computer science]. 2012, vol. 12, iss. 4, pp. 21–40. [In Russian]
2. Ostashev N. A. *Zavisimost' deformatsii materialov ot vremeni vozdeystviya nagruzki i skorosti ee prilozheniya* [The dependence of material deformation on the time of impact of the load and the speed of its application]. Kiev: Izd-vo Akademii arkhitektury Ukrainsoy SSR, 1954, 35 p. [In Russian]
3. Kartashkin B. D. *Trudy TsAGI* [Experimental studies of physical and mechanical properties of ice]. 1947, no. 607, 42 p. [In Russian]
4. Mel'nikova N. A. *Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya anizotropnykh sred (na primere ozernogo l'da): dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Numerical modeling of deformation and destruction of anisotropic media (on the example of lake ice): dis. ... candidate of physical and mathematical sciences]. Tomsk, 2010, 165 p. [In Russian]
5. Bychkovskiy N. N., Gur'yanov Yu. A. *Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravy* [Ice construction sites, roads, and crossings]. Saratov: SGTU, 2005, 258 p. [In Russian]
6. Bogorodskiy V. V., Gusev A. V., Doronin Yu. P., Kuznetsova L. N., Shifrin K. S. *Fizika okeana* [Physics of the ocean]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 296 p. [In Russian]
7. *Fizika i mekhanika l'da: per. s angl.* [Physics and mechanics of ice: trans. from English.]. Ed. P. Tryude. Moscow: Mir, 1983, 352 p. [In Russian]
8. Lobanov V. A. *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya* [Ice modeling in problems with finite element formulation]. 2008, no. 4. [In Russian]
9. Mel'nikova G. V., Matsarenko V. S., Serebryakov N. N. *Trudy TsIAM № 1344: Sovremennye metody obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley* [Works of CIAM No. 1344: Modern methods for ensuring the strength reliability of aircraft engine parts]. Moscow: TORUS PRESS, 2010, pp. 107–118. [In Russian]
10. Leblond A., Lamarche B., Bouchard D., Panaroni B., Hamel M. *The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures*. Canada, 2005, pp. 399–404.
11. Bogorodskiy V. V., Gavrilov V. P., Nedoshivin O. A. *Razrushenie l'da. Metody, tekhnicheskie sredstva* [Destruction of ice. Methods and technical means]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 232 p. [In Russian]
12. *Voprosy ledotekhniki: sb. st.* [Questions of ice engineering: coll. of art.]. Ed. K. N. Korzhavin. Novosibirsk, 1958. [In Russian]
13. Ji K., Rui X., Li L., Leblond A., McClure G. *Computers & Structures*. 2015, no. 157, pp. 153–164.
14. Sukhorukov S. I. *Avtomatizirovannaya sistema udaleniya l'da s provodov LEP: dis. kand. tekhn. nauk* [Automated system for the removal of ice from wires of power transmission lines : dis. ... cand. techn. sciences]. Komsomol'sk-on-Amur, 2016, 220 p. [In Russian]
15. Doronin Yu. P., Kheysin D. E. *Morskoy led* [Sea ice]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 318 p. [In Russian]
16. Korzhavin K. N. *Vozdeystvie l'da na inzhenernye sooruzheniya* [Impact of ice on engineering structures]. Novosibirsk: SO AN SSSR, 1962, 224 p. [In Russian]
17. Vershinin S. A. *Razrushenie i deformatsii morskikh ledyanykh poley, vzaimodeystvuyushchikh s ob'ektami kontinental'nogo shel'fa: dis. d-ra fiz.-mat. nauk* [Destruction and deformations of sea ice fields interacting with continental shelf objects: dis. ... doctor of physical and mathematical Sciences]. Moscow, 1984, 408 p. [In Russian]
18. Ratushnyak V. S. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway]. 2019, no. 1 (37), pp. 102–111. [In Russian]
19. *Pat. 2666754 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N 02 G 7/16. Sposob i ustroystvo dlya udaleniya naledi s provodov liniy elektroperedachi* [Pat. 2666754 Russian Federation, IPC N 02 G 7/16. Method and device for removal of ice from wires of power transmission lines]. Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V., Il'in E. S., Trukhina I. S., Ra-tushnyak V. S.; applicant and patent holder ООО «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Sib-TransNauka». No. 2017136405; appl.16.10.2017; publ.12.09.2018, bull. no. 26. [In Russian]
20. *Pat. 2666225 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N 03 L 3/53. Generator impul'snykh tokov dlya vysokovol'tnykh elektrogidravlicheskih tekhnologiy* [Pat. 2666225 Russian Federation, IPC N 03 L 3/53.

- Pulse current generator for high-voltage electro-hydraulic technologies]. Ratushnyak V. S., Garanin A. E., Yur'ev A. V., Il'in E. S.; applicant and patent holder ООО «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Sib-TransNauka». No. 2017123323; appl.03.07.2017; publ.06.09.2018, bull. no. 25. [In Russian]
21. Sergienko T. A., Il'in E. S., Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V. *Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: sb. nauch. tr.* [Problems and prospects of railway transport development: collection of scientific papers]. Krasnoyarsk: KrIZhT IrGUPS, 2015, vol. 1, pp 72–75. [In Russian]
 22. Iljin E. S., Vakhrusheva O. Yu., Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V. *VI International symposium on innovation and sustainability of modern railway.* Irkutsk, 2018, pp. 237–245.
 23. Ratushnyak V. S., Il'in E. S., Ratushnyak V. S. *Computational nanotechnology.* 2019, no. 2, pp. 33–38.

Ратушняк Валентина Сергеевна

аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Красноярск, ул. Новая заря, 2И)
E-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru

Ratushnyak Valentina Sergeevna

postgraduate student,
Irkutsk State Transport University
(2i Novaya zarya street, Krasnoyarsk, Russia)

Образец цитирования:

Ратушняк, В. С. Результаты экспериментального исследования ударного воздействия на лед, намороженный на провод ЛЭП / В. С. Ратушняк // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 59–66. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-8.