

Научная статья

УДК 532.322

doi: 10.17223/19988621/83/9

Влияние формы поперечной нагрузки на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова

Виктор Михайлович Козин

Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре, Россия, kozinvictor@rambler.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния формы в плане поперечной статической нагрузки на напряженно-деформированное состояние (НДС) ледяного покрова, что определяет его несущую способность (грузоподъемность) при кратковременных режимах нагружения. Ледяной покров рассматривается как изотропная упругая среда на упругом основании. Приведены результаты обзора экспериментально-теоретических исследований, подтверждающих правомерность такого подхода в условиях поставленной задачи. Сделан вывод о целесообразности исследований влияния формы поперечной нагрузки на изгибные напряжения в ледяном покрове при воздействии на него кратковременной статической нагрузки. Исследовалось влияние соотношения размеров сторон поперечной, статической, равномерно распределенной по площадям прямоугольника, круга и квадрата постоянной по суммарной величине нагрузки на НДС бесконечной, изотропной упругой ледяной пластины, лежащей на основании винклеровского типа. Сделано заключение относительно выбора наиболее целесообразных форм нагрузок с точки зрения обеспечения наибольшей несущей способности ледяного покрова.

Ключевые слова: ледяной покров, форма нагрузки, упругие деформации, напряжения, расчеты

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Для цитирования: Козин В.М. Влияние формы поперечной нагрузки на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 83. С. 102–110. doi: 10.17223/19988621/83/9

Original article

Effect of the transverse load shape on the stress-strain state of the ice cover

Victor M. Kozin

Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, kozinvictor@rambler.ru

Abstract. The aim of this work is to study the effect of the transverse static load shape on the stress-strain state of the ice cover. The construction of many hydraulic structures, offshore pipeline laying, and some types of track arrangements, in particular, blasting operations, are often associated with the use of the bearing capacity of the ice cover of rivers and reservoirs. Such works are being widely developed due to their significant productivity and economic efficiency in practice. Obviously, the use of ice cover requires special calculations to determine the safe load-carrying capacity for various loading conditions. In addition, river ice is often used for ferries and construction sites in various types of work. The available methods for determining the bearing capacity of the ice cover, based on theoretical developments and experimental studies in laboratory and field conditions, allow the use of the theory of elasticity under certain loading conditions. In these cases, the ice cover is considered as an isotropic elastic medium on the elastic foundation. Such an approach is approved by the reviewed experimental and theoretical studies as an expedient to study the effect of the transverse load shape on bending stresses in the ice cover.

In the framework of the formulated problem, the effect of the load shape on the stress-strain state of the ice cover is assessed considering the impact of the aspect ratio of the sides of the transverse static uniformly distributed over the rectangle area loading, which is constant in the total value, on the behavior of an infinite isotropic elastic ice plate arranged on elastic Winkler-type foundations. The calculations are performed for the same loads distributed over the circle and square areas. As a result, the most appropriate load shapes are determined.

Keywords: ice cover, load shape, elastic deformations, stresses, calculations

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of the state assignment for the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kozin, V.M. (2023) Effect of the transverse load shape on the stress-strain state of the ice cover. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 83. pp. 102–110. doi: 10.17223/19988621/83/9

Введение

Строительство многих гидротехнических сооружений, укладка на дно трубопроводов, некоторые виды путевых мероприятий, в частности взрывные работы, нередко бывают связаны с использованием несущей способности ледяного покрова рек и водоемов [1]. Такие работы получают широкое развитие, а практика подтверждает их значительную производительность и экономическую эффективность. Очевидно, что использование ледяного покрова в этом направлении требу-

ет выполнения специальных расчетов [2, 3], определяющих допустимую по условиям безопасности величину нагрузки при различных схемах ее приложения [4]. Помимо этого, ледяной покров рек часто используется путем устройства на нем переправ и строительных площадок для выполнения различных работ, которые также получают широкое развитие и обуславливают целесообразность данного исследования.

Цель работы – изучение влияния формы в плане поперечной статической нагрузки на напряженно-деформированное состояние (НДС) ледяного покрова, что определяет его несущую способность (грузоподъемность) при кратковременных режимах нагружения.

Краткий обзор экспериментально-теоретических исследований

Существующие методы определения несущей способности ледяного покрова можно разделить на две основные группы: расчеты по эмпирическим зависимостям, полученным в результате натурных наблюдений, и методы, основанные на использовании аппарата теории упругости. В последнем случае ледяной покров рассматривается как изотропная упругая среда, лежащая на упругом основании. К методам второй группы можно отнести решения, полученные К.Е. Ивановым и И.С. Песчанским [5], А.Е. Якуниным и И.П. Бутягиным [6], М.Ю. Орловым и Ю.Н. Орловой [7] на основании теоретических разработок и ряда экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях.

В этом направлении были проведены испытания ледяного покрова нарастающими нагрузками, приложенными по относительно небольшим контактным площадкам (круг, квадрат, слабо вытянутый прямоугольник). Данные эксперименты проводились для выяснения вопросов о том, какой теории прочности следует придерживаться при расчетах [8].

В работе [9] представлен опытный материал по зависимости проломного груза от толщины льда и площади распределения нагрузки. Опыты проводились при короткодействующих нагрузках. Вопросы, затронутые в этой статье, имеют практическую важность и в должной степени еще не изучены. Испытания льда на пролом проводилось силой при разном распределении нагрузки. Это достигалось тем, что подставки под концом штока в разных опытах имели различную площадь. Подставками служили эбонитовые и металлические круги диаметром 5 и 20 см, а также квадраты со сторонами в 20–65 см. В качестве груза использовался набор металлических болванок весом от 0,5 до 80 кг. Нагружение производилось по возможности в короткое время вплоть до пролома. При увеличении площади подставки в 200 раз проломный груз возрастал примерно только в 2 раза. Такая же картина наблюдалась для разных толщин льда. Температура воздуха слабо влияла на эту закономерность и величину проломного груза. При сравнении значений максимального прогиба при проломе в случаях пластической и упругой деформаций оказалось, что они примерно одинаковы. Таким образом, пролом льда определялся величиной предельной деформации независимо от быстрого нагружения или случая медленного развития пластической деформации под действием небольших нагрузок. Сделано заключение, что величина деформации имеет отношение к определению грузоподъемности льда при статических нагрузках. В работе также отмечено, что проломное состояние будет определяться в случае

больших нагрузок большой упругой деформацией и малой пластической, развивающейся, однако, с большой скоростью. При малых нагрузках, наоборот, оно определяется малой упругой деформацией и большой пластической, развивающейся очень медленно. Отмечено, что для расчетов других конструкций необходимо более детально знать влияние площади распределения нагрузки и формы подставки на чашу прогиба [9].

Расчету бесконечной плиты на центральную нагрузку посвящены работы С.С. Голушкевича [10], Г.Р. Брегмана и Б.В. Проскурякова [11] и др. Авторами на основании прогибов ледяного покрова предложены зависимости для определения изгибающих моментов и соответствующих напряжений.

Для расчета грузоподъемности ледяных переправ предложен целый ряд формул, из которых наиболее распространенной, простой, теоретически обоснованной и используемой до настоящего времени является формула, полученная С.А. Бернштейном [1].

Выполненный обзор известных работ показал, что поставленная в настоящей статье задача ранее не рассматривалась.

Зависимости для определения НДС ледяного покрова

Ледяной покров для большинства статических задач со сравнительно малым временем приложения нагрузки, как было отмечено выше, можно рассматривать как упругую однородную пластину, лежащую на упругом основании гидравлического типа [5, 6]. В работе [9] также отмечено, что в практических условиях, когда нагрузка на лед может быть велика, пролом льда может наступить непосредственно сразу же после ее приложения. В таких случаях пластическая деформация не успевает развиваться в значительной мере, и пролом является результатом в основном упругой деформации. Кроме этого, опыт эксплуатации ледяных переправ и экспериментальные исследования показывают, что при кратковременных нагрузках расчет грузоподъемности ледяного покрова может также основываться на теории изгиба тонких упругих плит на упругом основании. При этом в расчетах НДС ледяных переправ обычно принимается, что ледяной покров имеет неограниченные размеры в плане [3], а его физико-механические характеристики соответствуют речному льду.

Рассматриваемая задача в такой постановке имеет практическое значение и при транспортировке по льду грузов с малыми (ниже критических [12]) скоростями, т.е. возникающие при этом нагрузки можно считать квазистатическими, когда пластическими свойствами льда можно пренебречь, а также при складировании на ледяном покрове грузов (использование ледяного покрова в качестве грузонесущих платформ) [9].

Для оценки влияния формы нагрузки на НДС ледяного покрова, т.е. решения поставленной в настоящей работе задачи, исследовано влияние соотношения размеров сторон a и b поперечной, статической, равномерно распределенной по площади прямоугольника, постоянной по суммарной величине нагрузки (рис. 1) на поведение бесконечной, изотропной упругой ледяной пластины, лежащей на упругом основании винклеровского типа.

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины имеет вид [10]:

$$D\nabla^4 w + \rho_v g w = q(x, y), \quad (1)$$

где: $D = Eh^3/12(1 - \mu^2)$ – цилиндрическая жесткость пластины; E – модуль упругости льда; h – толщина ледяного покрова; w – прогиб ледяного покрова; ρ_B – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; $q(x, y)$ – приложенная к пластине нагрузка.

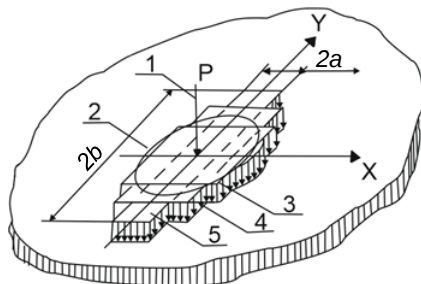


Рис. 1. Схема расчетных случаев: 1 – сосредоточенная сила; 2 – нагрузка распределена по площади круга; нагрузка распределена по площади прямоугольника: 3 – $b/a = 1.0$; 4 – $b/a = 2.0$; 5 – $b/a = 5.5$

Fig. 1. Model for computations: (1) concentrated force; (2) load distribution over the circle area; load distribution over the rectangle area: $b/a =$ (3) 1.0; (4) 2.0; and (5) 5.5

Решение этого уравнения может быть представлено в виде:

$$w = \frac{4q}{\pi^2 D} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\sin \lambda a \sin \eta b \cos \lambda x \cos \eta y \, d\lambda d\eta}{\lambda \eta [(\lambda^2 + \eta^2)^2 + a^4]}. \quad (2)$$

Тогда максимальные по толщине пластины напряжения запишутся так:

$$\begin{cases} (\sigma_x)_{\max} = \frac{6M_x}{h^2} = -\frac{6D}{h^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \\ (\sigma_y)_{\max} = \frac{6M_y}{h^2} = -\frac{6D}{h^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \\ (\tau_{xy})_{\max} = \frac{6M_{xy}}{h^2} = \frac{6D}{h^2} (1 - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \end{cases} \quad (3)$$

где: M_x, M_y, M_{xy} – изгибающие моменты.

Из этих соотношений получим:

$$\begin{cases} (\sigma_x)_{\max} = \frac{24q}{(\pi h)^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{(\lambda^2 + \mu \eta^2) \sin \lambda a \sin \eta b \cos \lambda x \cos \eta y \, d\lambda d\eta}{\lambda \eta [(\lambda^2 + \eta^2)^2 + a^4]}, \\ (\sigma_y)_{\max} = \frac{24q}{(\pi h)^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{(\eta^2 + \mu \lambda^2) \sin \lambda a \sin \eta b \cos \lambda x \cos \eta y \, d\lambda d\eta}{\lambda \eta [(\lambda^2 + \eta^2)^2 + a^4]}, \\ (\tau_{xy})_{\max} = \frac{24q(1-\mu)}{(\pi h)^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\sin \lambda a \sin \eta b \cos \lambda x \cos \eta y \, d\lambda d\eta}{(\lambda^2 + \eta^2)^2 + a^4}. \end{cases} \quad (4)$$

Расчеты по формулам (2) и (4) были выполнены для $h = 0.50$ м при наиболее вероятных характеристиках речного льда [13]: $\mu = 0.33$, $E = 3$ ГПа, $\rho_L = 920$ кг/м³, $\rho_B = 1000$ кг/м³.

Результаты расчетов НДС ледяного покрова

Для расчетных схем (см. рис. 1) при $q = 2$ кПа, $S = 4ab = 200$ м² результаты расчетов приведены на рис. 2–5. Аналогичные расчеты также были выполнены для распределенной по площади круга и квадратной в плане нагрузок при одинаковой их суммарной величине, т.е. при выполнении условия $qS = \text{const}$. Их результаты представлены на рис. 5.

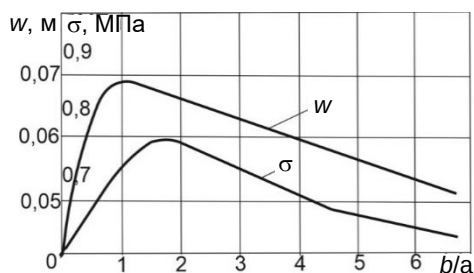


Рис. 2. Зависимость $w^{\max}$ и $\sigma^{\max}$ от отношения сторон прямоугольной в плане нагрузки
Fig. 2. Dependence of $w^{\max}$ and $\sigma^{\max}$ on the ratio of the sides of the rectangular area loaded

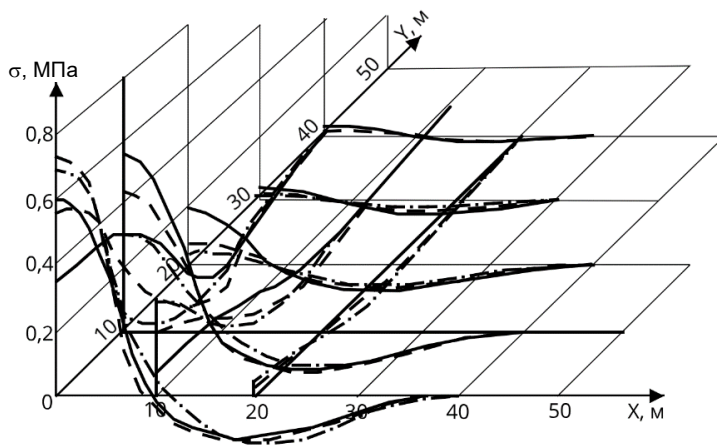


Рис. 3. Поле нормальных напряжений в пластине, нагруженной прямоугольной в плане нагрузкой: — $b/a = 5.5$; --- $b/a = 2.0$; - · - · - $b/a = 1.0$

Fig. 3. The field of normal stresses in the plate with the rectangular area loaded:
 — $b/a = 5.5$; --- $b/a = 2.0$; and - · - · - $b/a = 1.0$

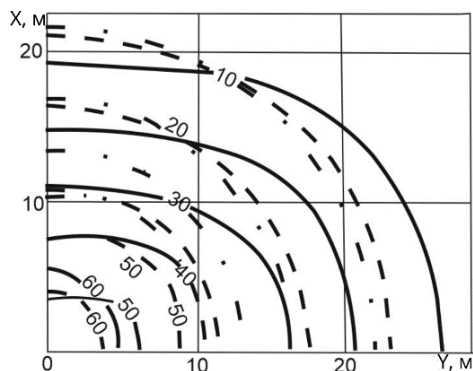


Рис. 4. Линии равных прогибов w (мм) для разных отношений b/a :
 — $b/a = 5.5$; --- $b/a = 2.0$; - · - · - $b/a = 1.0$

Fig. 4. Isolines of deflections w (mm) for various ratios of b/a :
 — $b/a = 5.5$; --- $b/a = 2.0$; and - · - · - $b/a = 1.0$

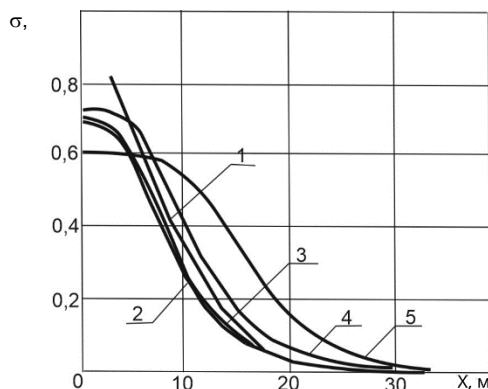


Рис. 5. Кривые нормальных напряжений σ (при $y = 0$) для различных случаев нагрузки

Fig. 5. Curves of normal stresses σ (at $y = 0$) for various loading conditions

Закключение

Как и следовало ожидать, ледяной покров получает наибольший прогиб, если на него действует сосредоточенная, нежели неизменная по суммарной величине распределенная нагрузка. Нагрузки, распределенные по равновеликим площадям круга и квадрата, практически не влияют на поля прогибов и напряжений в ледяной пластине (см. рис. 5). При неизменной интенсивности нагрузки, прогибы пластины возрастают при $a \rightarrow b$ и достигают максимального значения в случае $b/a \approx 1.8$ (см. рис. 2). С увеличением b/a от 1 до 5.5 возникающие во льду максимальные прогибы и напряжения уменьшаются примерно на 50% (см. рис. 2). Таким образом, при использовании ледяного покрова в качестве грузонесущих платформ (например, при обустройстве складских помещений) или транспортировке по льду грузов со скоростями ниже критических [9] следует уменьшать интенсивность нагрузки (увеличивать ее площадь распределения) и избегать при этом круглой или квадратной формы, т.е. отдавать предпочтение площадям с наибольшими относительно их ширины длинами.

Список источников

1. Бернштейн С.А. Ледяная железнодорожная переправа // Ледяные переправы : XVIII сборник отдела инженерных исследований НКТ НКПС. М. : Транспечать, 1929. 42 с.
2. Панфилов Д.Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова // Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. 1960. Т. 6. С. 61–75.
3. Панфилов Д.Ф. Приближенный метод расчета грузоподъемности ледяного покрова // Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники. 1960. Т. 60. С. 221–224.
4. Бутягин И.П. Расчет несущей способности ледяного покрова по его прочностным характеристикам // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. Новосибирск, 1979. № 143. С. 81–91.
5. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л. : Гидрометеиздат, 1967. 467 с.
6. Якунин А.Е., Бутягин И.П. Расчеты несущей способности ледяного покрова // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. 1974. Вып. 88. С. 66–81.

7. Orlov M.Y., Orlova Y.N. Phenomenological Model and Numerical Method // Combined Theoretical and Experimental Study of Ice Behavior Under Shock and Explosive Loads. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham : Springer, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-97634-7_1
8. Панфилов Д.Ф. Условие разрушения и прочность ледяного покрова при изгибе нарастающей поперечной нагрузкой // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л. : Энергия. 1973. С. 89–94.
9. Кобеко П.П., Шишкин Н.И., Марей Ф.И., Иванова Н.С. Пролом и грузоподъемность льда // Журнал технической физики. 1946. Т. 16, вып. 3. С. 273–276.
10. Голушкевич С.С. О некоторых задачах теории изгиба ледяного покрова. Л. : Воениздат, 1947. 231 с.
11. Брегман Г.Р., Проскуряков Б.В. Ледяные переправы. Свердловск : Гидрометеониздат, 1943. 151 с.
12. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М. : Академия естествознания, 2007. 355 с.
13. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 4–41.

References

1. Bernstein S.A. (1929) Ledianaya zheleznodorozhnaya pereprava [Ice railway crossing]. *Ledyanye perepravy. XVIII sbornik otdela inzhenernykh issledovaniy NKT NKPS*. Moscow: Transpechat'.
2. Panfilov D.F. (1960) Eksperimental'nye issledovaniya gruzopod"emnosti ledyanogo pokrova [Experimental studies of the carrying capacity of the ice cover]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 6. pp. 61–75.
3. Panfilov D.F. (1960) Priblizhennyi metod rascheta gruzopod"emnosti ledyanogo pokrova [Approximate method for calculating the carrying capacity of the ice cover]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 60. pp. 221–224.
4. Butyagin I.P. (1979) Raschet nesushchey sposobnosti ledyanogo pokrova po ego prochnostnym kharakteristikam [Calculation of the bearing capacity of the ice cover in terms of its strength characteristics]. *Trudy Novosibirskogo instituta inzhenerov vodnogo transporta*. Novosibirsk. 143. pp. 81–91.
5. Peschanskiy I.S. (1967) *Ledovedenie i ledotekhnika* [Ice science and engineering]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
6. Yakunin A.E., Butyagin I.P. (1974) Raschety nesushchey sposobnosti ledyanogo pokrova [Calculations of the bearing capacity of the ice cover]. *Trudy Novosibirskogo instituta inzhenerov vodnogo transporta*. Novosibirsk. 88. pp. 66–81.
7. Orlov M.Y., Orlova Y.N. (2022). *Phenomenological Model and Numerical Method*. In: Combined Theoretical and Experimental Study of Ice Behavior Under Shock and Explosive Loads. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-97634-7_1
8. Panfilov D.F. (1973) Uslovie razrusheniya i prochnost' ledyanogo pokrova pri izgibe narastayushchey poperechnoy nagruzkoj [Fracture and strength condition of the ice cover during bending by increasing transverse load]. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike*. Leningrad: Energiya. pp. 89–94.
9. Kobeiko P.P., Shishkin N.I., Marey F.I., Ivanova N.S. (1946) Prolom i gruzopod"emnost' l'da [Break and ice load capacity]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics*. 16(3). pp. 273–276.
10. Golushkevich S.S. (1947) *O nekotorykh zadachakh teorii izgiba ledyanogo pokrova* [On some problems of the theory of ice sheet bending]. Leningrad: Voenizdat.

11. Bregman G.R., Proskuryakov B.V. (1943) *Ledyanye perepravy* [Ice crossings]. Sverdlovsk: Gidrometeoizdat.
12. Kozin V.M. (2007) *Rezonansnyy metod razrusheniya ledyanogo pokrova. Izobreteniya i eksperimenty* [Resonant method of ice cover destruction. Inventions and experiments]. Moscow: Academy of Natural History.
13. Petrov I.G. (1976) Vybor naibolee veroyatnykh znacheniy mekhanicheskikh kharakteristik l'da [Selection of the most probable values of mechanical characteristics of ice]. *Trudy AANII – Proceedings of the AARI*. 331, pp.4–41.

Сведения об авторе:

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: kozinvictor@rambler.ru

Information about the author:

Kozin Victor M. (Doctor of Technical Sciences, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation). E-mail: kozinvictor@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2022; принята к публикации 01.06.2023

The article was submitted 22.04.2022; accepted for publication 01.06.2023