ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

В.М. КОЗИН

Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, Россия

kozinvictor@rambler.ru

Резюме

Целью данной работы являлось обобщение известных данных и проведение опытов по определению релаксационных свойств льда в составе ледяного покрова при кратковременном (не более 1 мин) нагружении. Проблема заключается в том, что при решении прикладных задач ледотехники лед часто рассматривается как упругий изотропный материал, а для изучения его напряженно-деформированного состояния (НДС) привлекают аппарат теории изгиба упругих пластин. Это не позволяет выполнять теоретические расчеты при возбуждении движущимися нагрузками резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ), т. к. в этих условиях прогибы льда возрастают до бесконечности и известные решения становятся непригодными. В действительности лед отчетливо проявляет свойства квазиизотропной среды, причем соотношения между напряжениями и деформациями носят вязкоупругий характер. В работе отмечено, что в зависимости от режима нагружения ледяного покрова внешними нагрузками его неупругие свойства по-разному влияют на характер его поведения, при этом вязкоупругие свойства ледяного покрова хорошо описываются линейными моделями неупругих сплошных сред Максвелла или Кельвина–Фойгта. На основании соответствующей обработки известного экспериментального материала и результатов выполненных в полевых условиях экспериментальных исследований методом нагружения ледяного покрова уравновешенными нагрузками с помощью специально изготовленного нагружающего устройства, представлявшего собой раму с тремя опорами (это позволяло исключать влияние на результаты экспериментов ложной упругости воды) для указанных реологических моделей поведения льда приведены наиболее вероятные диапазоны изменения времен релаксации напряжений и деформаций ледяного покрова в рассмотренных ледовых условиях. Полученные результаты могут быть использованы при теоретических исследованиях задач ледотехники.

Ключевые слова: время релаксации, вязкоупругая среда, ледяной покров, режим нагружения.

Для цитирования: Козин В.М. Релаксационные свойства ледяного покрова // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 165–176. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-165-176>.

Поступила 01.02.2021

После переработки 14.05.2021

Принята 03.06.2021

RELAXATION PROPERTIES OF THE ICE COVER

VICTOR M. KOZIN

*Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia**kozinvictor@rambler.ru*

Summary

The aim of this work was to generalize the known data and conduct experiments to determine the relaxation properties of ice in the ice cover under short-term (no more than 1 min.) loading. The problem lies in the fact that when one is solving applied problems of ice engineering, ice is often considered as an elastic isotropic material, and its stress-strain state (SSS) is studied in terms of the theory of bending of elastic plates. This does not allow performing theoretical calculations when resonant flexural gravity waves (IGW) are excited by moving loads, because under these conditions, the deflections of the ice increase to infinity and the known solutions become unusable. In fact, ice clearly manifests the properties of a quasi-isotropic medium, and the relationship between stresses and deformations is of a viscoelastic nature. It is noted in the work that, depending on the mode in which external loads act on the ice cover, its inelastic properties affect the nature of its behavior in different ways, while the viscoelastic properties of the ice cover are well described by the linear models of Maxwell or Kelvin-Voigt inelastic continuous media. The experimental material is duly processed and analysis is carried out of the results of experimental studies performed in the field by loading the ice cover with balanced loads using a specially made loading device, which was a frame with three supports. The design of the device made it possible to load the ice cover with balanced loads, which made it possible to exclude the influence of false elasticity of water on the results of experiments. For the rheological models of ice behavior indicated, the most probable ranges of changes in the relaxation times of stresses and deformations of the ice cover in the ice conditions considered are given. The results obtained can be used in theoretical studies of ice engineering problems.

Keywords: ice cover, loading mode, relaxation time, viscoelastic medium.

For Citation: Kozin V.M. Relaxation properties of the ice cover. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (2): 165–176. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-165-176>.

Received 01.02.2021

Revised 14.05.2021

Accepted 03.06.2021

ВВЕДЕНИЕ

При решении прикладных задач ледотехники лед часто рассматривается как упругий изотропный материал, а для изучения его напряженно-деформированного состояния (НДС) привлекают аппарат теории изгиба упругих пластин. Однако в действительности лед отчетливо проявляет свойства квазиизотропной среды, причем соотношения между напряжениями и деформациями носят вязкоупругий характер. Одновременно с этим многие экспериментаторы считают, что при кратковременных нагрузках определяющей является упругая деформация льда.

При воздействии внешних усилий на ледяной покров неупругие свойства льда влияют на характер его изгиба по-разному в зависимости от режима нагружения и вида напряженного состояния. И.С. Песчанский [1] отмечает, что лед работает упруго до разрушения, если период действия нагрузки не превышает 0,5–1,0 мин. В этом случае пластическая деформация не успевает развиваться и разрушение льда определяется в основном упругой деформацией, а для сравнительно малых, но длительных нагрузок характерно разрушение ледяного покрова с малой упругой и большой пластической деформацией. К подобному выводу пришли и авторы работ

[2, 3]. Пластические деформации во льду появляются даже при незначительных напряжениях, особенно при малых скоростях нагружения [4].

Таким образом, при медленно изменяющихся нагрузках отчетливо обнаруживаются свойства ползучести и релаксации льда. При колебательных процессах неупругие свойства льда приводят к диссипации механической энергии, проявляющейся в затухании колебаний. Релаксационные процессы, происходящие во льду, обуславливаются взаимодействием между упругой (твердой) и вязкой (жидкой) фазами. Наличие вязкой фазы объясняется существованием во льду: примесей, сгруппированных в межкристаллических прослойках; ячеек с рассолом; гидратированных солей, выпавших в осадок; и пр. [5]. В зависимости от того, определяется ли полная деформация льда деформацией твердой или жидкой фазы, лед относится к упруго-запаздывающим или релаксирующим средам [6]. Исследования [7, 8] показывают, что вязкоупругие свойства ледяного покрова хорошо описываются линейными моделями неупругих сплошных сред.

Целью данной работы являлось обобщение известных данных и проведение опытов по определению релаксационных свойств льда в составе ледяного покрова при кратковременном (не более 1 мин) нагружении.

РАССМОТРЕННЫЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Если колебания ледяного покрова происходят с большим периодом или рассматривается его поведение при медленных изменениях нагрузки, т. е. при малых относительных скоростях деформаций, то из множества существующих моделей деформирования неупругих сплошных сред [6] следует принимать модель среды Максвелла с линейной релаксацией [7], механизм работы которой представлен на рис. 1а.

В этом случае уравнение малых вынужденных колебаний ледяного покрова принимает вид [7]:

$$\frac{Gh^3}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 w + \left(\frac{1}{\tau_M} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\rho_v \cdot gw + \rho_l h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_v \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \right) = q, \quad (1)$$

где G — модуль упругости льда при сдвиге; h — толщина ледяного покрова; w — прогиб льда; τ_M — время релаксации напряжений; g — ускорение силы тяжести; ρ_v — плотность воды; ρ_l — плотность льда; q — система внешних нагрузок; Φ — потенциал движения жидкости.

Рис. 1. Линейные модели вязкоупругих сред: а) Максвелла; б) Кельвина–Фойгта

Fig. 1. Linear models of viscoelastic media: а) Maxwell; б) Kelvin–Voigt

Если на такую среду действует $\sigma = \text{const}$, то она деформируется с некоторой скоростью (явление последействия). При поддержании в этой среде постоянных деформаций напряжения с течением времени убывают, т. е. тело релаксирует.

Для колебательных процессов, периоды которых много меньше времени релаксации для льда, можно принять закон деформирования линейной упруго-запаздывающей среды Кельвина–Фойгта (рис. 1б). Тогда уравнение малых вынужденных колебаний ледяного покрова можно записать в виде [7]:

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_b \cdot gw + \rho_\pi h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_b \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = q, \quad (2)$$

где τ_ϕ — время релаксации деформаций.

Это уравнение справедливо при малом рассеивании энергии, т. е. при динамических режимах, например при быстрых колебательных процессах [5]. Среда Кельвина–Фойгта при $\sigma = \text{const}$ проявляет последействие и, как видно из рис. 1б, не релаксирует. Эта модель более полно отражает поведение и свойства реальных тел при знакопеременных динамических нагрузках, так как описывает петлю гистерезиса, затухание колебаний и последействие [9].

Таким образом, при теоретических исследованиях прикладных задач волновых колебаний ледяного покрова необходимы сведения о пластических свойствах льда. Пластические, или вязкостные, свойства материала характеризуются коэффициентом внутреннего трения, или коэффициентом вязкости, η . Как известно, под внутренним трением подразумеваются необратимые в энергетическом отношении процессы, сопровождающие циклические деформации материала при любом уровне напряжений и обусловленные внутренним движением (диффузией) частиц материала.

Внутреннее трение является важной динамической характеристикой льда. Оно проявляется с наибольшей полнотой и оказывает наибольшее влияние на НДС льда при колебательных процессах. Оно существенно уменьшает напряжения и деформации льда, возникающие при волновых колебаниях ледяного покрова от действия внешних нагрузок, особенно при их распространении с резонансными скоростями [7].

При колебаниях ледяного покрова из известных форм внешнего проявления внутреннего трения [10] можно наблюдать следующие:

- потребление определенной энергии на поддержание установившихся колебаний ледяного покрова;
- ограничение амплитуды резонансных колебаний льда при действии возмущающей силы постоянной величины;
- затухание свободных колебаний ледяного покрова, заключающееся в уменьшении их амплитуды с удалением от места возбуждения;
- сдвиг фаз между действующей на лед внешней нагрузкой и вызываемыми ее действием деформациями.

При действии на лед нагрузки, изменяющейся во времени, пластические свойства льда проявляются через его ползучесть и релаксацию. Если колебания ледяного покрова происходят с большим периодом, то коэффициент внутреннего трения определяют по формуле [7]:

$$\eta_M = \tau_M \cdot G. \quad (3)$$

Значение τ_M определяют из соответствующих опытов с ледяным покровом в естественных условиях.

При колебательных процессах с малым периодом коэффициент внутреннего трения льда определяют по формуле:

$$\eta_{\phi} = \tau_{\phi} \cdot G. \quad (4)$$

Величину τ_{ϕ} можно определить по записям свободных затухающих изгибных колебаний ледяного покрова.

Результаты экспериментального определения значений коэффициента внутреннего трения льда имеются в работах многих исследователей. Однако полученные данные характеризуются большим разбросом в пределах от 10^{11} до 10^{15} пуаз и более [4]. Некоторые причины этого указаны в работе [11]. Время релаксации льда по этим данным для известных значений G может колебаться от несколько секунд до нескольких часов и суток, т. е. коэффициент η применительно ко льду не является определенной физической константой и имеет условный характер, т. к. может изменяться в широких пределах в зависимости от режима нагружения, времени действия и величины нагрузки, вида напряженного состояния, структуры, температуры льда и т. д. Так, с понижением температуры коэффициент для пресного льда может увеличиться в 2–3 раза, а для морского — в десятки раз [12]. В связи с этим при решении конкретных задач вязкостные свойства ледяного покрова необходимо определять отдельно для каждого расчетного случая соответствующими методами.

Недостаточная изученность и отсутствие достоверных данных о вязкостных и релаксационных свойствах льда обусловили необходимость проведения дополнительных определенных опытов, а также соответствующей обработки известного экспериментального материала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На ранних стадиях экспериментально-теоретических исследований НДС ледяного покрова при действии внешних нагрузок знание величины τ_m необходимо для определения общих предпосылок к расчетам и, в частности, для выбора реологической модели льда как материала. Устойчивые значения τ_m для льда получены в настоящее время только в лабораторных условиях. Поведение льда в составе ледяного покрова из-за особенностей его структуры, изменения температуры по толщине, наличия упругого основания, самозалечиваемости трещин и других причин слабо изучено и пока не поддается строгому анализу. Поэтому опыты по определению релаксационных свойств ледяного покрова были проведены в натурных (полевых) условиях. При проведении экспериментов учитывалось также то, что в естественных условиях ледяной покров, благодаря своеобразию работы под поперечной нагрузкой, обладает свойством, которое можно назвать ложной упругостью. Упругое основание, каким является вода, способствует более быстрому исчезновению определенной части деформаций льда после снятия с него нагрузки [13].

В поставленных опытах эффект действия ложной упругости сводился к минимуму тем, что нагружение ледяного покрова осуществлялось уравновешенной системой сил. При такой нагрузке общая величина интенсивности отпора воды равнялась нулю. На рис. 2 приведена схема изготовленного для такого нагружения релаксметра напряжений. Он состоял из вертикальной стойки высотой 1 м и приваренной к ней перекладины длиной 3 м. На концах перекладины для свободного перемещения стального троса устанавливались ролики. Стойка передавала вертикальную нагрузку на лед через опору площадью 900 см². Трос через динамометр

Рис. 2. Общий вид изготовленного релаксметра напряжений: 1 — вертикальная стойка; 2 — перекладина; 3 — ролики; 4 — опора; 5 — трос; 6 — динамометр; 7 — талреп; 8 — ледяной покров; 9 — планки; 10 — отверстия; 11 — вода

Fig. 2. General view of the manufactured stress relaxometer: 1 — vertical rack; 2 — crossbar; 3 — rollers; 4 — support; 5 — cable; 6 — dynamometer; 7 — lanyard; 8 — ice cover; 9 — slats; 10 — holes; 11 — water

и нагружающий талреп крепился ко льду при помощи вмораживаемых в лед планок. Для этого в ледяном покрове сверлились два отверстия диаметром 100 мм. Вмораживание планок в лед производилось при слабо натянутом тросе. Площадь одной планки составляла около 75 см². Талрепом создавалось необходимое натяжение троса, затем ледяной покров предоставлялся сам себе, и с помощью динамометра наблюдалось явление релаксации.

Результаты этих наблюдений приведены на рис. 3а. Опыты проводились с речным ледяным покровом толщиной $h = 0,35$ м при температурах воздуха $t = -0,5$ °C (кривая 1) и $t = -2,5$ °C (кривые 2, 3, 4). Следует заметить, что резкое отличие в поведении льда (см. кривые 2, 4 на рис. 3а) произошло благодаря тому, что второй опыт был проведен сразу после первого, т. е. свойства ледяного покрова не успели восстановиться до исходного состояния (как в первом опыте). Прочность льда в опытах определялась путем разрушения образцов льда в виде плавающих консольных балок — клавишей. Отличия в полученных значениях разрушающих напряжений можно объяснить разницей температур атмосферного воздуха.

Рис. 3. Кривые релаксации напряжений: а — в ледяном покрове (1 — при $t = -0,5$ °C; 2, 3, 4 — при $t = -2,5$ °C); б — в ледяных балках (по работе [14])

Fig. 3. Stress relaxation curves: а — in the ice cover (1 — at $t = -0,5$ °C; 2, 3, 4 — at $t = -2,5$ °C); б — in ice beams (according to [14])

Характер экспериментальных кривых оказался таким, что наиболее интенсивная релаксация наблюдалась в начальный период после прекращения роста деформации льда. Затем процесс постепенно замедлялся, и величина нагрузки стремилась к постоянному значению. Качественно этот результат совпал с данными Б.Д. Карташкина в его опытах с ледяными балками [14] (рис. 3б), т. е. при отсутствии упругого основания и перепада температуры по толщине, т. к. балки выдерживались до выравнивания температуры. Это можно объяснить тем, что наличие в образцах льда температурного градиента по их толщине, т. е. от температуры наружного воздуха практически вплоть до нуля на поверхности их соприкосновения с водой, слабо сказывается на упругопластических свойствах ледяного покрова. Возможно, что для морского льда количественное проявление релаксационных свойств льда будет иным.

Этот вывод позволяет существенно упростить и уменьшить затраты при изучении указанных физико-механических свойств ледяного покрова, т. к. позволяет проводить соответствующие исследования на ледяных балках в лабораторных, а не в полевых условиях с натурным ледяным покровом.

При этом было отмечено, что если в пластическом материале напряжения при постоянной деформации с течением времени исчезают, то в упругопластическом они убывают лишь до некоторого предела, величина которого определяется его пределом упругости, но только в указанных диапазонах времени (при отсутствии начала ползучести).

В опытах Б.Д. Карташкина исследовались балки, приготовленные путем заливки речной воды в опалубку с последующим ее замораживанием. Такие балки автор назвал балками из наливного речного льда.

Проведенные эксперименты подтвердили чрезвычайную устойчивость процесса релаксации у льда. С повышением величины первоначальных напряжений релаксация протекала более интенсивно в начальный момент, а сам процесс становился более длительным. Однако время релаксации напряжений практически не изменялось (табл. 1). Величина τ_m определялась по зависимости, предложенной Шведовым [4, 14] (рассматривалась релаксация избытка силы над пределом упругости), в предположении, что по истечении 6–7 часов в проведенных опытах с ледяным покровом и 0,6–0,7 часа — с ледяными балками (опыты Б.Д. Карташкина) напряжения практически перестают релаксировать (рис. 3). При этом допущении полученные значения τ_m несколько занижаются, но поскольку нас интересуют минимально возможные значения τ_m для ледяного покрова в естественных условиях, т. е. определение минимальной несущей способности ледяного покрова, то такое предположение можно считать допускающим ошибку в безопасную сторону.

Попутно в опытах было также подтверждено ранее известное следующее явление. Напряжения в ледяном покрове при изгибных деформациях релаксируют тем быстрее, чем скорее после начального нагружения начинается релаксация (см. рис. 3). Аналогичный вывод получен К.Ф. Войтковским для льда беспорядочной структуры при сжатии [4]. Это позволяет сделать вывод о корректности методики проведения опытов. Было замечено также, что время релаксаций напряжений возрастает с увеличением периода первоначальной ползучести (табл. 1). На основании обработки известных данных и выполненных исследований установлены изменения значений времени релаксации напряжений в пределах 0,2–2,0 ч для исследованных ледовых условий.

Таблица 1

Table 1

Результаты экспериментального определения времени релаксации напряжений для льда

Results of experimental determination of stress relaxation time for ice

Источник данных	№ опыта	Вид льда	Размеры образцов, см	Температура, t , °C	Величина нагрузки P , кН	Вид нагружения	σ_{max} , МПа	Продолжительность испытаний t , ч	Период ползучести до начала релаксации, t , ч	Время релаксации напряжений τ_r , ч
Опыты К.Ф. Войтковского [11]	1	лед беспорядочной структуры	–	–3,0	–	сжатие	0,7	5,0	0,1	0,20*
	2	(определение автора)	8×12×100	–3,0	0,8	сжатие	0,7	5,0	1,4	0,75
	3			–3,0		сжатие	–	–	8,0	2,25
Опыты Б.Д. Карташкина [14]	1	речной	8×12×100	–9,5	0,8	изгиб	0,4	0,7	0,0	0,17
	2	речной	8×12×100	–11,0	1,5	изгиб	0,8	0,7	0,0	0,17
	3	наливной	8×12×100	–11,0	2,0	изгиб	1,1	0,7	0,0	0,17
Эксперименты автора	1	речной	бесконечная	–0,5	1,0	изгиб	0,25	7,0	0,0	1,70
	2	ледяной	пластина	–2,5	1,00	изгиб	0,50	7,0	0,0	1,75
	3	покров	толщиной $h = 35$	–2,5	1,98	изгиб	0,50	7,0	0,0	1,72
	4			–2,5	1,96	изгиб	–	7,0	24,0	2,50

* В опытах К.В. Войтковского τ_r определялось в предположении, что предел упругости льда близок к нулю

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Время релаксации деформаций (время запаздывания) ледяного покрова при τ_ϕ его колебаниях определялось через такую форму внешнего проявления вязкостных свойств, как затухание свободных колебаний, т. е. по развертке свободных затухающих колебаний ледяного покрова. Зная параметры изгибно-гравитационных волн (ИГВ) во льду и определив по записи свободных колебаний логарифмический декремент затуханий, можно определить τ_ϕ . Имеющиеся экспериментальные данные позволили определить τ_ϕ по амплитудам затухающих колебаний:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\delta t}, \quad (5)$$

где $A(t)$ — амплитуды затухающих колебаний; A_0 — начальное значение амплитуды; δ — коэффициент затухания.

Для этого вначале по известным записям свободных затухающих колебаний ледяного покрова, позаимствованных из работ [1, 15, 16, 17, 18, 19], строились графики относительных амплитуд затухающих колебаний $\bar{A}(t) = e^{-\delta t}$. Общий вид этих кривых представлен на рис. 4–5, при этом время релаксации (время, в течение которого амплитуда гармонических затухающих колебаний уменьшается в e раз) определялось так:

$$\tau_\phi = 1/\delta = f(A/e) \quad (6)$$

Результаты определения τ_ϕ сведены в табл. 2. Полученные значения τ_ϕ показали устойчивость релаксационных процессов в ледяном покрове, колеблющемся с интересующими нас частотами. Как видно из табл. 2, значительные изменения толщины льда, его температуры и изменение структуры льда (сравнивался речной и морской лед) не оказывали существенного влияния на величину τ_ϕ .

Средние значения времени запаздывания у ледяного покрова в рассмотренных ледовых условиях лежат в пределах 5–15 с. Полученные относительно устойчивые результаты позволяют использовать их в теоретических расчетах.

Рис. 4. Кривые относительных амплитуд затухающих колебаний ледяного покрова: а — по работе [16], полученных при разных расстояниях между записывающими приборами и осью трассы: 1 — 20 м, 2 — 15 м, 3 — 10 м, 4 — 5 м, 5 — 2 м; б — по работе [15], полученных при различных массах движущихся нагрузок: 1 — 5 т, 2 — 11 т, 3 — 13 т, и по работе [19], полученных при различных скоростях движения нагрузки: 4 — 10,3 м/с, 5 — 9,1 м/с, 6 — 8,2 м/с

Fig. 4. Curves of the relative amplitudes of damped oscillations of the ice cover: а — according to [16], obtained at different distances between the recording devices and the axis of the track: (1 — 20 m, 2 — 15 m, 3 — 10 m, 4 — 5 m, 5 — 2 m); б — according to [15], obtained at various masses of moving loads: 1 — 5 t, 2 — 11 t, 3 — 13 t, according to [19], obtained at different speeds of the load movement: 4 — 10.3 m/s, 5 — 9.1 m/s, 6 — 8.2 m/s

Рис. 5. Кривые затухания: *a* — амплитуд колебаний ледяного покрова по работе [1] при движении нагрузки с разными скоростями: 1 — 2,6 м/с, 2 — 19,4 м/с; по работе [18] при распространении волн сжатия 3 и растяжения 4; *b* — относительных угловых деформаций по работе [17] при нестационарном движении нагрузки: 1 — при торможении, 2 — при разгоне

Fig. 5. Damping curves: *a* — amplitudes of oscillations of the ice cover according to [1] when the load moves at different speeds: 2.6 m/s, 2 — 19.4 m/s; according to [18] with compression (3) and tension (4) waves propagating;; *b* — relative angular deformations according to [17] with unsteady movement of the load: 1 — when braking, 2 — when accelerating

Таблица 2

Экспериментальные значения времени релаксации деформаций ледяного покрова

Table 2

Experimental values of the relaxation time of ice cover deformations

Вид льда	Толщина ледяного покрова, м	Температура льда, °C	Пределы изменения τ_{ϕ} , с	Источник данных
Речной	0,60	2–6	5,5–15,6	[16]
	0,38	–6	5,2–7,0	[1]
	0,80	–10	7,0–10,0	[19]
Морской	0,60	–	6,8–9,8	[17]
	2,5–3,0	–	11,2–13,8	[15]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный обзор и проведенный соответствующий анализ известных данных и полученных результатов позволяют установить наиболее вероятный диапазон изменения времен релаксации ледяного покрова в рассмотренных ледовых условиях. Их окончательные значения могут быть уточнены в процессе сопоставления результатов теоретических расчетов с данными экспериментов. Таким образом, проделанная работа позволит сузить диапазон поиска значений времен релаксации, т. е. уменьшить трудоемкость исследований при решении определенных прикладных задач ледотехники.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. The author declares the absence of competing interest.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Номер гос. регистрации темы 01201456194.

Funding. This work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal

Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. State number registration 01201456194.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Песчанский И.С.* Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 467 с.
2. *Кобеко П.П., Шишкин Н.И., Марей Ф.И., Иванова Н.С.* Пластическая деформация и вязкость льда // Журнал технической физики. 1946. Т. 16. Вып. 3. С. 263–272.
3. *Crary A.P., Cotell R.D., Oliver J.C.* Geophysical studies in the Beaufort Sea 1951 // Trans. Amer. Geoph. Union. 1952. V. 33. P. 211–216.
4. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 99 с.
5. *Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.* Морской лед. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 318 с.
6. *Фрейденваль А., Гейрингер Х.* Математические теории неупругой сплошной среды. М.: Физматгиз, 1962. 432 с.
7. *Хейсин Д.Е.* Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 р.
8. *Хейсин Д.Е.* К задаче упруго-пластического изгиба ледяного покрова // Труды ААНИИ. 1964. Т. 267. С. 143–149.
9. *Волков В.М.* Модели сплошных сред и прикладные задачи пластичности. Горький: ГПИ им. А.А. Жданова, 1972. 124 с.
10. *Сорокин Е.С.* Методы экспериментального определения внутреннего трения в твердых материалах // Труды МИИТ. 1964. Вып. 193. С. 5–41.
11. *Войтковский К.Ф.* Реология льда и снега // Труды первого всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. Ереван, 1973. С. 26–42.
12. *Лавров В.В.* Вязкость льда в зависимости от температуры // Журнал технической физики. 1949. Т. 17. Вып. 9. С. 1027–1034.
13. *Голушкевич С.С.* О некоторых задачах теории изгиба ледяного покрова. Л.: Воениздат, 1947. 231 с.
14. *Карташкин Б.Д.* Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда // Труды ЦАГИ. 1947. № 607. 42 с.
15. Деформации и напряжения в целых ледяных полях при возбуждении изгибно-гравитационных волн движущейся нагрузкой // Отчет ААНИИ. Научный руководитель темы В.В. Богородский. Шифр темы 076. Инв. № Р-3843. Л., 1978. 18 с.
16. *Иванов К.Е., Кобеко П.П., Шульман А.Р.* Деформация ледового покрова при движении грузов // Журнал технической физики. 1946. Т. 16. С. 257–262.
17. *Смирнов В.Н.* Исследование изгибных колебаний дрейфующего льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1966. Вып. 23. С. 47–49.
18. *Смирнов В.Н.* Некоторые вопросы натурного исследования деформаций и напряжений в ледяном покрове // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 133–140.
19. *Takizawa T.* Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load // Cold Regions Sci. Techn. 1985. V. 11. P. 171–180.

REFERENCES

1. *Peschansky I.S.* *Ledovedenie i ledotehnika*. Ice science and ice engineering. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967: 467 p. [In Russian].
2. *Kobeko P.P., Shishkin N. A., Marey F. I., Ivanova N.S.* Plastic deformation and viscosity of ice. *Journal Technicheskoy Fiziki*. Journal of Technical Physics. 1946, 16 (3): 263–272. [In Russian].

3. Crary A. P., Cotell R. D., Oliver. J.C. Geophysical studies in the Beaufort Sea 1951. Transactions Amer. Geoph. Union. 1952, 33: 211–216.
4. Voitkovsky K.F. *Mekhanicheskie svoystva l'da*. Mechanical properties of ice. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1960: 100 p. [In Russian].
5. Doronin Yu.P., Kheisin D.E. *Morskoy led*. Sea ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975: 318 p. [In Russian].
6. Freudenthal A., Geiringer. X. *Matematicheskie teorii neuprugoy sploshnoy sredy*. Mathematical theories of inelastic continuous medium. Moscow: Fizmatgiz, 1962: 432 p. [In Russian].
7. Kheisin D.E. *Dinamika ledyanogo pokrova*. Ice cover dynamics. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967: 216 p. [In Russian].
8. Kheisin D.E. On the problem of elastic-plastic bending of the ice cover. *Trudy AANII*. Proceedings AARI. 1964, 267: 143–149. [In Russian].
9. Volkov V.M. *Modeli sploshnykh sred i prikladnye zadachi plastichnosti*. Continuous media models and applied problems of plasticity. Gorky: State Pedagogical Institute named after A.A. Zhdanov, 1972: 124 p. [In Russian].
10. Sorokin E.S. Methods for the experimental determination of internal friction in solid materials. *Voprosy prikladnoy mekhaniki*. Proceedings MIIT. 1964, 193 (7) : 5–41. [In Russian].
11. Voitkovsky K.F. Rheology of ice and snow. Proceedings First All-Union Symposium on Soil Rheology (Dilijan, 20–25 April 1972). Yerevan: Yerevan State University, 1973: 26–42. [In Russian].
12. Lavrov V.V. Ice viscosity versus temperature. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki*. Journal of Technical Physics. 1949, 17 (9): 1027–1034. [In Russian].
13. Golushkevich S.S. *O nekotorykh zadachakh teorii izgiba ledyanogo pokrova*. On some problems in the theory of ice bending. Leningrad: Voenizdat, 1947: 231 p. [In Russian].
14. Kartashkin B.D. *Eksperimental'nye issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv l'da*. Experimental studies of the physical and mechanical properties of ice. *Trudy TSAGI*. Proceedings TsAGI. Moscow: Bureau of New Technology. 1947, 607: 43 p. [In Russian].
15. *Deformatsii i napryazheniya v tselykh ledyanykh polyakh pri vzbuzhdenii izgibno-gravitatsionnykh voln dvizhuzheysa nahruzkoj*. Deformations and stresses in whole ice fields upon excitation of flexural-gravitational waves by a moving load. *Otchet AANII*. Report AARI. Scientific supervisor of the topic V.V. Bogorodsky. Topic code 076. Inv. No. R-3843. L. 1978. 18 p. [In Russian].
16. Ivanov K.E., Kobeko P.P., Shulman A.R. Deformation of the ice cover during the movement of goods. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. Journal of Technical Physics. 1946, 16: 257–262. [In Russian].
17. Smirnov V.N. Study of bending vibrations of drifting ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 1966, 23: 47–49. [In Russian].
18. Smirnov V.N. Some questions of full-scale investigation of deformations and stresses in the ice cover. *Trudy AANII*. Proceedings of the AARI. 1976, 331: 133–140. [In Russian].
19. Takizawa T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load. *Cold Regions Sci. and Techn.* 1985, 11: 171–180.