

УДК 627.8:624.145.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.296>

## **Беззаторный пропуск льда через гидроузлы в эксплуатационный период**

**Н. Н. Фомичева<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0003-1278-3199>

**В.Н. Кофеева<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-7361-7947>

<sup>1</sup>*Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Актуальной на сегодняшний день остается задача обеспечения беспрепятственного прохождения льда во время весеннего ледохода через гидротехническое сооружение. Обеспечение беззаторного пропуска весеннего льда может быть достигнуто устройством конструкций, которые создают такие гидродинамические условия, при которых происходит разлом льдин на более мелкие. В работе поставлена цель: получения теоретических решений по определению сил, действующих на льдину при её прохождении через перепад; изгибающих моментов, создающих условия разлома льдин. Выделены и рассмотрены основные схемы прохождения льдины через сосредоточенный перепад. Получены решения по расчёту разлома. Определены архимедовы силы для всех пяти схем движения льдины. Получены уравнения для расчёта изгибающих моментов относительно произвольно выбранного сечения, дифференцирование которых даёт зависимость по определению расстояния до опасного сечения. Вводя некоторые допущения, разработан приближённый метод расчёта разлома льдин в любом сечении. Для создания сосредоточенного перепада предлагается устройство сооружения перед основным гидроузлом; конструкция подтверждена авторским свидетельством.

**Ключевые слова:** беззаторный пропуск льда; сосредоточенный перепад; низконапорные гидроузлы; разлом ледяных полей.

## **Non-congestion ice passage through hydraulic units during the operational period**

**Nyailya N. Fomicheva<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0003-1278-3199>

**Vera .N. Kofeeva<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-7361-7947>

<sup>1</sup>*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The task of ensuring unhindered ice passage during the spring ice drift through hydraulic structures remains relevant today. Non-congestion passage of spring ice can be achieved by installation of structures that create such hydrodynamic conditions under which ice floes break into smaller ones. The aim of the research is to obtain theoretical solutions for determining the forces acting on an ice floe when passing through a drop; the bending moments that create conditions for breaking ice floes. The main schemes of ice floe passage through the concentrated drop are highlighted and examined. Solutions for calculating the ice break have been obtained. The Archimedean forces are determined for all five schemes of ice floe movement. The authors have obtained the equations for calculating bending moments relative to a randomly selected section, the differentiation of which gives a dependence on the determination of the distance to the dangerous section. Introducing some assumptions, an

approximate method for calculating the ice floes split in any section has been developed. To create a concentrated drop, it is proposed to build a structure in front of the main hydro unit; the design is confirmed by the author's certificate.

**Keywords:** uncontrolled ice passage; concentrated drop; low-pressure hydroelectric power plants; ice field fault.

### **Введение**

Возведение гидротехнических сооружений на реках меняет их естественный гидрологический режим. На реках в условиях сурового климата могут возникать факторы, способствующие формированию заторов в весенний период. Заторы относятся к опасным явлениям, вызывающим затопление территории [1,2]. Поэтому проектирование гидроузлов должно выполняться с учётом пропуска льда.

Анализ и обобщение опыта пропуска льда на строящихся и построенных гидроузлах, теоретические разработки и развитие исследований по изучению прочностных свойств льда в весенний период, учёт гидродинамических процессов дают возможность грамотно и обоснованно компоновать ледобросные сооружения [3,4,5].

Однако предварительные расчёты показали, что ширина пролётных сооружений многих гидроузлов составляет от 5 до 12 метров. В таких случаях необходимо в эксплуатационный период предусматривать мероприятия по временному задержанию ледохода, уменьшению прочности и толщины ледяного покрова перед вскрытием, что ведёт к увеличению затрат при эксплуатации сооружений.

В связи с поставленной задачей следует рассмотреть новое конструктивное решение гидроузла, обеспечивающего успешный пропуск льда. Аналогом может служить схема пропуска льда в строительный период через не полностью разобранный перемычку, где формируется сосредоточенный перепад уровней.

Как показали исследования, мелкие льдины беспрепятственно проходят в нижний бьеф, заторных явлений перед сооружением и выше сосредоточенного перепада не наблюдалось. Таким конструктивным решением может служить создание вспомогательного порога, на котором формируется сосредоточенный перепад, способствующий разлому ледяных полей и пропуску отдельных льдин в нижний бьеф.

Успешный пропуск льда зависит от многих факторов, один из главных – размер льдины вдоль потока. Чем он меньше, тем при более узких пролётах возможен пропуск льда. Натурные наблюдения на р. Онеге и р. Иртыше показали, что длина льдин вдоль потока составляет от 30 до 50 метров. Пропуск их возможен при ширине пролётных отверстий от 20 до 24 м [6]. Поэтому целесообразно создать выше основного сооружения сосредоточенный перепад. Льдина, двигаясь через этот перепад испытывает напряжения. Если эти напряжения оказываются больше предела прочности, то льдина ломается.

Целью работы является получение теоретических решений для определения сил, действующих на перемещающуюся в потоке льдину и изгибающих моментов, возникающих в любом произвольно выбранном сечении. Предлагается конструкция низконапорного гидроузла, обеспечивающего беспрепятственный пропуск льда в эксплуатационный период. Рассматривается движение твёрдого тела, погруженного в жидкость.

### Материалы и методы

Использование расчётно-теоретического метода ранее представлено в работах [7,8]. Также определённый интерес представляют методы, в которых учитываются динамика движения льдины и потока [9]. В изложенных методах учитываются силы, действующие на льдину со стороны потока, сила Архимеда, вес льдины и инерционные силы.

Проектируя действующие силы на оси M и N (рис.1), получим

$$\left. \begin{aligned} F_{\tau}^{(ui)} &= -\sum_{i=1}^n F_{ui} \sin \alpha + F_g \sin \alpha + F_T \cos(\alpha - \varphi) + F_i \sin(\alpha - \varphi); \\ F_i^{(ui)} &= \sum_{i=1}^n F_{ai} \cos \alpha - F_g \cos \alpha + F_T \sin(\alpha - \varphi) - F_i \sin(\alpha - \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

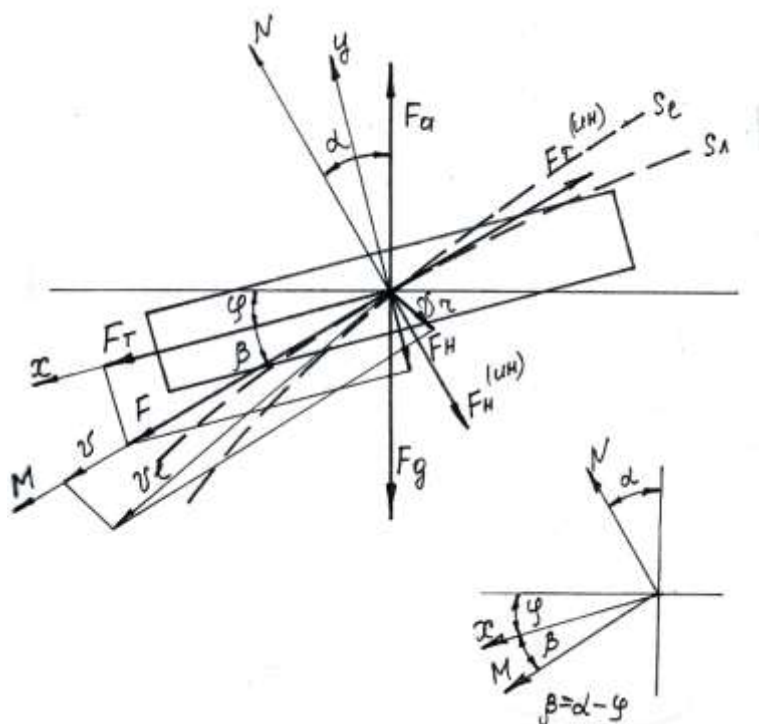


Рис. 1 Расчётная схема. Нагрузки, действующие на льдину

Значение архимедовой силы  $F_a$  определится по зависимости:

(2)

$$\sum_{i=1}^n F_{ai} = \rho_b \cdot g \cdot B \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2)$$

где  $\rho_b$  – плотность воды;  
 $g$  – ускорение силы тяжести;

$\sum_{i=1}^n S_i$  – площадь части льдины, погруженной в воду, определяется как сумма площадей  $S_1 + S_2 + \dots + S_n$  в зависимости от положения льдины на перепаде.

В процессе движения льда через сосредоточенный перепад можно выделить пять основных схем (рис.2). На схеме 1 передний торец льдины прошёл сосредоточенный перепад и находится на расстоянии  $l$ , от оси  $\xi$ . Верхняя кромка переднего торца возвышается над свободной поверхностью воды в нижнем бьефе на величину  $C$ . Верхняя поверхность льдины не касается воды.

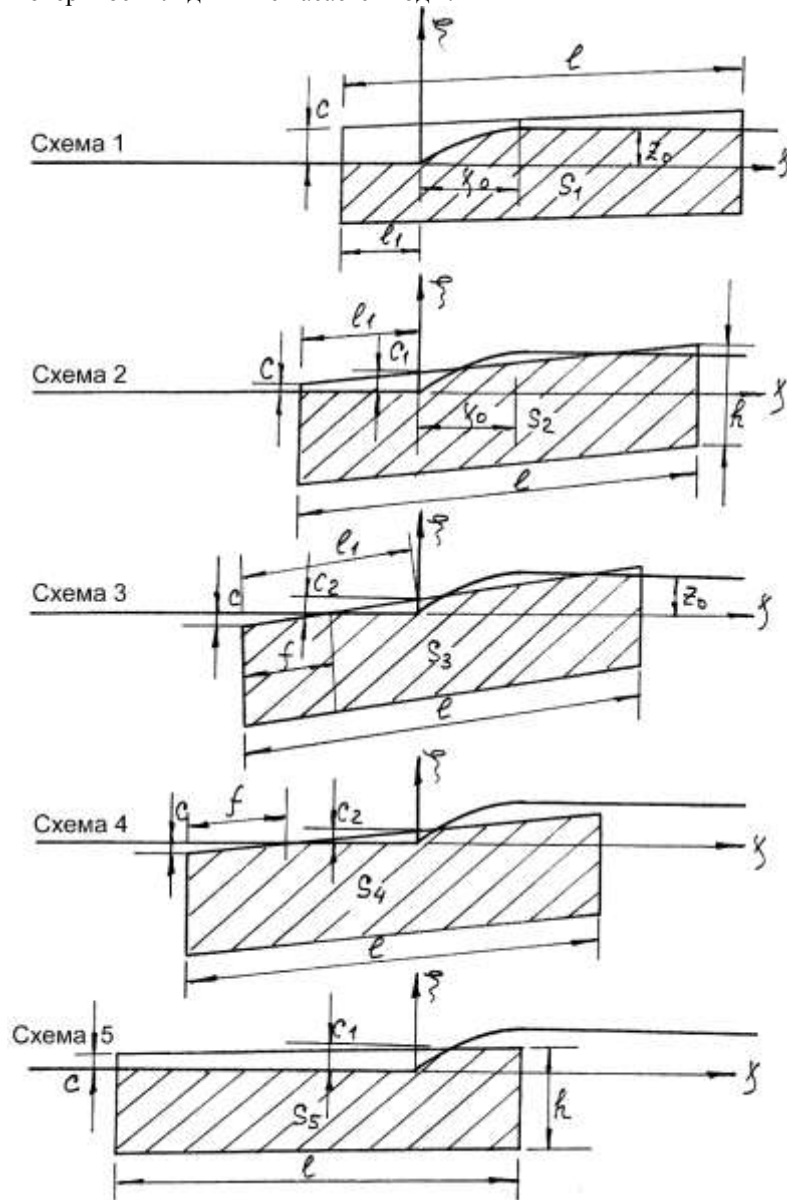


Рис. 2. Схемы движения льдины через сосредоточенный перепад

На схеме 2 – верхняя поверхность льдины в районе сосредоточенного перепада пересекается со свободной поверхностью воды в двух местах. На схеме 3 – расстояние от переднего торца льдины до точки пересечения верхней её поверхности со свободной поверхностью воды в нижнем бьефе равно  $f$ .

Согласно схемам, в напряженном состоянии могут находиться верхние, нижние слои льда или одновременно оба слоя. В процессе движения льдины, как внутри схемы, так и переходе одной в другую, меняется архимедова сила. Согласно (2) определение этих сил сводится, в основном, к отысканию площади продольного сечения льдины, погруженного в воду.

В системе уравнений (1) неизвестными остаются величины: угол наклона льдины  $\varphi$  и глубина погружения верхней части торца льдины  $C$ , которые определяются подбором.

### Результаты

Полный комплекс выполненных теоретических исследований позволил получить уравнения для расчёта изгибающих моментов относительно произвольно выбранного сечения:

$$M = \cos \varphi \sum_{i=1}^n F_{ai} \cdot x_i + \frac{1}{2} F_{\tau}^{(ui)} \cdot x \sin \alpha - \frac{1}{2} F_g \cdot x \cos \varphi - \frac{1}{2} F_l \cdot x \cos(\alpha - \varphi) - \frac{1}{2} F_l^{(ui)} \cdot x \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\sum_{i=1}^n F_{ai} \cdot x_i = \rho_b g B \sum_{i=1}^n S_i x_i$  ;

$x_i$  – расстояние от центра тяжести элементарной площадки, погруженной в воду части льдины до рассматриваемого сечения.

Дифференцируя уравнение (3) по  $x$  и приравнивая его к нулю, получаем зависимость, по которой можно определить расстояние до опасного сечения.

Приближенный метод расчёта изгибающих моментов и расстояния до опасного сечения предполагает следующие допущения: действительная плавная кривая спада заменяется сосредоточенным перепадом; влияние инерционных сил не учитывается.

В результате получаем уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n F_{ai} &= F_g; \\ \sum_{i=1}^n F_{ai} \cdot l - \frac{1}{2} F_g \cdot l &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Значение момента архимедовой силы определится как

$$\sum_{i=1}^n F_{ai} \cdot l = \rho_b g B \sum_{i=1}^n S_{oi} \cdot l. \quad (5)$$

Значение изгибающего момента относительно выбранного сечения:

$$M_{x-x} = \sum_{i=1}^n F_{ai} x_i - \frac{1}{2} F_g x, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^n F_{ai} \cdot x_i = \rho_b g B \sum_{i=1}^n S_i x_i$ .

Расстояние до опасного сечения:

$$\frac{dM_{x-x}}{dx} = \rho_b g B \frac{d\left(\sum_{i=1}^n S_i x_i\right)}{dx} - x_0 \rho_b g h B = 0. \quad (7)$$

Для определения  $S_i$ ;  $S_i \cdot x_{oi}$  и  $S_i \cdot x_i$  необходимо рассмотреть все пять схем движения льда через перепад. На рисунке 3 приведены схемы 3 и 5.

Получены приближенные зависимости для расчёта разрушения льда при движении его через сосредоточенный перепад. Например, для схемы 5

$$\frac{d \sum_{i=1}^n S_i x}{dx} = x_0 (h - c) + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi (l_1^2 - 2x l_1). \quad (8)$$

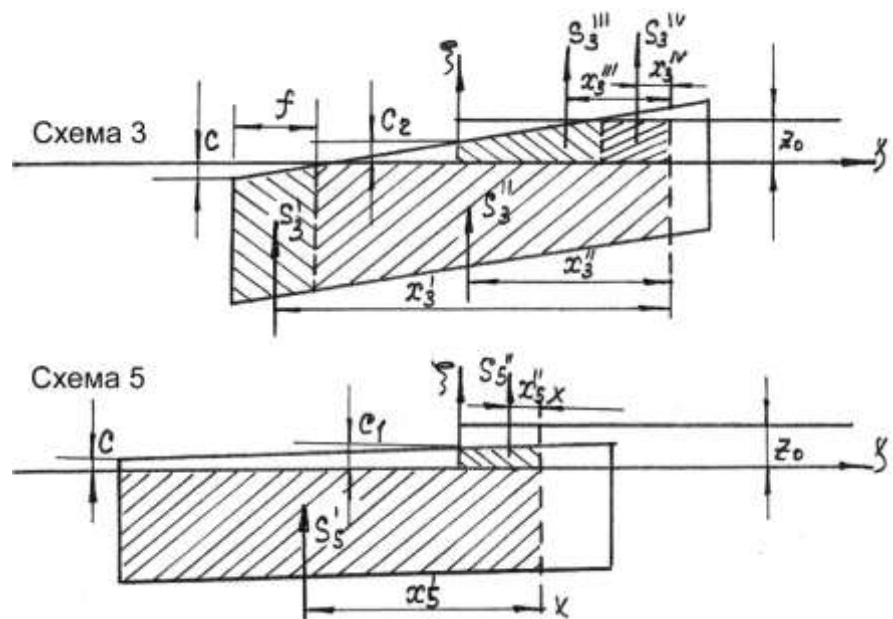


Рис. 3. Расчётные схемы 3 и 5 к определению изгибающих моментов относительно сечения X-X

**Обсуждение**

В период эксплуатации гидротехнические сооружения подвергаются воздействию ледяных полей, которые вызывают повреждения отдельных элементов конструкций. В верхнем бьефе низконапорных гидроузлов могут наблюдаться заторные явления, приводящие к значительному повышению уровня. Для обеспечения пропуска льда в эксплуатационный период применяются различные технологические мероприятия. В данной работе предлагается использовать конструктивный метод решения проблемы. Разработаны конструкции в виде вспомогательного порога, обеспечивающая разлом ледяных полей на мелкие льдины и беспрепятственный пропуск его в нижний бьеф; предлагаемые конструкции защищены авторскими свидетельствами [10]. Одно из сооружений представлено на рис.4.

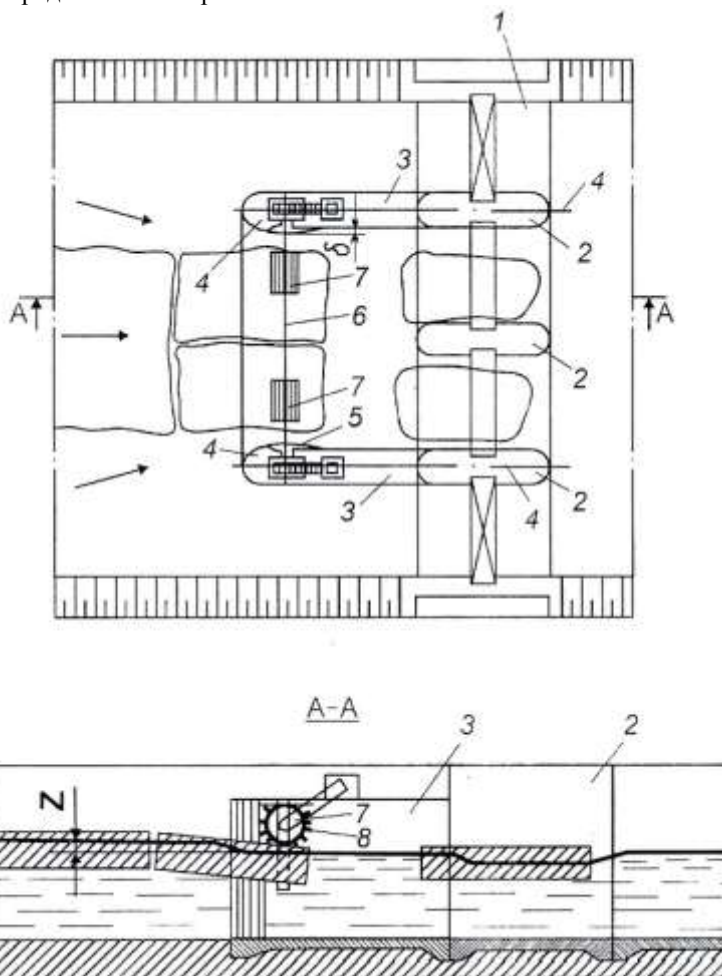


Рис. 4. Схема конструкций, обеспечивающая пропуск льда через гидросооружение.  
 1 – водослив; 2 – бычки; 3 – стенки; 4 – оголовки бычков; 5 – водоворотная зона шириной  $\delta$ ; 6 – вал; 7 – полые барабаны; 8 – зубья

Сооружение для пропуска льда, показанное на рисунке 4 и схема его работы описаны в бюллетене изобретений [10].

Таким образом, достигнуты поставленные цели: предложена конструкция, обеспечивающая пропуск льда; разработан теоретический метод расчёта разлома льдин на сосредоточенном перепаде.

#### **Заключение**

1. Выделены основные схемы прохождения льдины через сосредоточенный перепад.
2. Определены архимедовы силы, действующие на льдину, для этих расчётных схем.
3. Разработан приближенный метод расчёта сил, действующих на отдельную льдину во время прохождения сосредоточенного перепада и изгибающего момента, возникающих в любом сечении для всех рассмотренных схем.
4. Разработана конструкция вспомогательного порога, устройство которого перед основным водосливом позволит создать перепад уровней и тем самым будет способствовать разлому ледяных полей и успешному пропуску льда.

#### **Список литературы**

1. Болгов Н. В., Борщ С. В., Хазиахметов Р. М. Опасные гидрологические явления: методы анализа, расчета и прогнозирования, смягчение негативных последствий. // Тезисы докладов. VII Всероссийский гидрологический съезд. СПб. 2013. С.6-12.
2. Gelfan A., Gustafsson D., Motoviliv Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenev A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. *Clim Change*. 2017. Vol.141, pp.449-515. Doi 10.1007/s10584-016-1710-5.
3. Панфилов Д. Ф. Разрушение ледяных полей под влиянием местных изменений уровня воды // Гидротехническое строительство. 1965. № 12. С. 21–25.
4. Коржавин К. Н. Пропуск льда при строительстве и эксплуатации гидроузлов. М.: Энергия. 1973. 160 с.
5. Fomicheva N. N. The constructions, which provide passing of ice through low-pressure waterworks in spring period / Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Totonto). May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
6. Фомичев Б. С., Фомичева Н. Н., Кротов С. А. Натурные исследования прочности льда Новосибирского водохранилища // Материалы Международной научно-практической конференции. Пермь: Пермский государственный университет. 2008. С.113-118.
7. Fomicheva N., Panov D., Kalashnikov A. Studies of the movement of ice through low-pressure waterwork. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Doi: 10.1088/1742-6596/2131/3/032072.
8. Fomicheva N., Heckert E., Modina M., Beryoza I. Calculation of the fracture of the ice fields at a concentrated drop. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Doi: 10.1088/1755-1315/867/1/012005.
9. Циликин В. Ф. Моделирование пропуска льда при проведении лабораторных гидравлических исследований // Исследования и расчёты заторов льда, вопросы ледотермики и гидродинамики. Л.: Гидрометеиздат. Вып.192. 1972. С.30-36.
10. Авторское свидетельство №1476061 – Сооружение для пропуска льда через гидротехническое сооружение. Фомичева Н. Н. – опубл. В БИ. 1989. №6.

#### **References**

1. Bolgov N. V., Borshch S. V., Khaziakhmetov R. M. Opasnye gidrologicheskie yavleniya: me-tody analiza, rascheta i prognozirovaniya, smyagchenie negativnykh posledstvii. // Tezisy dokladov. VII Vserossiiskii gidrologicheskii s"ezd. SPb. 2013. S.6-12.



2. *Gelfan A., Gustafsson D., Motoviliv Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenev A.* Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. *Clim Change*. 2017. Vol.141, pp.449-515. Doi 10.1007/s10584-016-1710-5.
3. *Panfilov D. F.* Razrushenie ledyanykh polei pod vliyaniem mestnykh izmenenii urovnya vody // *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 1965. № 12. S. 21–25.
4. *Korzhavin K. N.* Propusk l'da pri stroitel'stve i ehkspluatatsii gidrouzlov. M.: Ehnergiya. 1973. 160 s.
5. *Fomicheva N. N.* The constructions, which provide passing of ice through low-pressure waterworks in spring period / *Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Totonto)*. May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
6. *Fomichev B. S., Fomicheva N. N., Krotov S. A.* Naturnye issledovaniya prochnosti l'da Novosibirskogo vodokhranilishcha // *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Perm': Permskii gosudarstvennyi universitet. 2008. S.113-118.
7. *Fomicheva N., Panov D., Kalashnikov A.* Studies of the movement of ice through low-pressure waterwork. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Doi: 10.1088/1742-6596/2131/3/032072.
8. *Fomicheva N., Heckert E., Modina M., Beryoza I.* Calculation of the fracture of the ice fields at a concentrated drop. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Doi: 10.1088/1755-1315/867/1/012005.
9. *Tsilikin V. F.* Modelirovanie propuska l'da pri provedenii laboratornykh gidravlicheskiikh issledovaniy // *Issledovaniya i raschety zatorov l'da, voprosy ledoter-miki i gidrodinamiki*. L.: Gidrometeoizdat. Vyp.192. 1972. S.30-36.
10. Avtorskoe svidetel'stvo №1476061 – Sooruzhenie dlya propuska l'da cherez gidrotekhnicheskoe sooruzhenie. Fomicheva N. N. – publ. V BI. 1989. №6.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Фомичева Няиля Николаевна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры Водных изысканий, путей и гидротехнических сооружений Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ginelli@ngs.ru.

**Nyailya N. Fomicheva**, Ph.D in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Water Surveys, Ways and Hydraulic Structures Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, e-mail: ginelli@ngs.ru

**Кофеева Вера Николаевна**, старший преподаватель кафедры Строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: v.n.kofeeva@nsawt.ru

**Vera N. Kofeeva**, Senior Lecturer of the Department of Construction Production, Structures and Protection of Water Resources, Siberian State University of Water Transport" (FSFEI HE "SSUWT"), 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: v.n.kofeeva@nsawt.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2022; опубликована онлайн 20.09.2022  
Received 18.05.2022; published online 20.09.2022.