

УДК 627.8:624.145.4

DOI: 10.37890/jwt.vi84.629

Исследования формы свободной поверхности потока, образующейся на сосредоточенном перепаде

Н. Н. Фомичева

ORCID: 0000-0003-1278-3199

О. В. Спиренкова

ORCID: 0000-0002-1401-189X

А. С. Тушина

ORCID: 0000-0001-5128-9383

Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. Методика расчета разлома ледяных полей на сосредоточенном перепаде основывается на большой базе исходных данных, включая форму свободной поверхности потока и скорости перемещения льдин. Актуальность рассматриваемой темы не вызывает сомнений. В связи с чем возникает необходимость проведения серии лабораторных исследований, целью которых является описание свободной поверхности потока на перепаде. Разрушение ледяных полей и обеспечение успешного пропуска через гидроузлы возможно при создании системы «порог-водослив», в которой имеет место их взаимное влияние на формирование скоростей и свободной поверхности. В настоящее время нет надежных способов построения кривых свободной поверхности над порогом и водосливами.

В работе поставлены задачи по изучению влияния наличия сосредоточенного перепада на положение свободной поверхности потока и динамику движения льдин во время весеннего ледохода. Методы выполнения поставленных задач основываются на экспериментальных исследованиях. Лабораторные исследования по изучению движения льдин через сосредоточенный перепад проводились на специально созданной установке. При этом был выполнен подбор критериев подобия и масштаба моделирования. Получены уравнения для определения скоростей движения льдин на подходе к основному водосбросному сооружению. Исследования свободной поверхности потока позволили получить для их описания эмпирические зависимости, которые также необходимы при выполнении расчетов по разлому льдин. Выполнено сопоставление данных лабораторных и теоретических исследований, которое показало достаточную их сходимость. Приведены практические рекомендации по использованию полученных результатов.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, низконапорные гидроузлы, пропуск льда, сосредоточенный перепад, свободная поверхность потока, скорость движения льдин, разлом ледяных полей

Studies of the shape of the free flow surface formed on a concentrated drop

Nyailya N. Fomicheva

ORCID: 0000-0003-1278-3199

Olga V. Spirenkova

ORCID: 0000-0002-1401-189X

Alexandra S. Tushina

ORCID: 0000-0001-5128-9383

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The methodology for calculating the fracture of ice fields on a concentrated drop is based on a large database of initial data, including the shape of the free flow surface and the speed of movement of ice floes. The relevance of the topic under consideration is beyond doubt. In this connection, it becomes necessary to conduct a series of laboratory studies, the purpose of which is to describe the free flow surface at the drop. The destruction of ice fields and the provision of successful passage through waterworks is possible with the creation of the threshold-weir system, in which their mutual influence on the formation of velocities and free surface takes place. Currently, there are no reliable ways to plot free surface curves above the threshold and weirs.

The paper sets out the tasks of studying the effect of the presence of a concentrated drop on the position of the free surface of the flow and the dynamics of the movement of ice floes during the spring ice drift. The methods of performing the tasks are based on experimental research. Laboratory studies on the movement of ice floes through a concentrated drop were carried out on a specially created installation. At the same time, the criteria of similarity and scale of modeling were selected. Equations for determining the velocities of ice floes on the approach to the main spillway are obtained. Studies of the free flow surface have made it possible to obtain empirical dependences for their description, which are also necessary when performing calculations on ice breakage. A comparison of laboratory and theoretical research data was performed, which showed sufficient convergence. Practical recommendations on the use of the obtained results are given.

Keywords: hydraulic structures, low-pressure waterworks, ice passage, concentrated drop, free flow surface, speed of movement of ice floes, ice fields at once

Введение

Проблема пропуска льда через низконапорные гидроузлы остается актуальной и в настоящее время [1,2,3,4,5,6].

Пропуск льда в эксплуатационный период всегда сопряжен с определенными трудностями [7,8,9]. Как правило, в весенний период водохранилище сработано до минимально допустимых отметок, и ледяные поля при малых глубинах на гребне водослива приводят к его истиранию. При недостаточной ширине пролетных отверстий и плавной кривой спада, на которой не происходит разлома ледяных полей, возможно скопление льдин и образование затора [10]. Лед, поступающий через гребенку в нижний бьеф, воздействует на водосливную грань и оказывает разрушающее действие на гасители водобоя. Назначение схемы пропуска льда в период эксплуатации основывается на проверке и уточнении размеров ширины ледобросного фронта и размеров отдельных пролетов водосливной плотины, а также формировании водной поверхности перед водобросным сооружением.

Пропуск льда в строительный период осуществлялся практически на всех гидроузлах Сибири и Дальнего Востока [11,12,13]. Во время пропуска льда сооружения, как правило, имеют небольшую высоту, а водохранилище – отсутствует, поэтому пропуск льда является более сложным. При этом условия ледохода определяются гидравлическим режимом на участке верхнего бьефа, включая значения поверхностных скоростей течения.

Многие ученые внесли большой вклад в решение вопросов, связанных с пропуском льда в строительный и эксплуатационный периоды.

Проведенные натурные исследования на реках Иртыше и Онеге показали, что при весеннем ледоходе длина льдин составляла от 30 до 50 м [14]. Пропуск льда возможен при ширине пролетных отверстий 20÷24 м. Д.Ф. Панфилов [15, 16], анализируя опыт пропуска льда через некоторые гидроузлы, установил, что для районов Сибири минимальная ширина водобросных отверстий средненапорных гидроузлов должна составлять 11÷16 м. При таких размерах пролетных отверстий для успешного пропуска льда необходимо предусматривать некоторые мероприятия как технологического плана, так и конструктивных решений [17,18]. Возведение вспомогательного порога перед основным сооружением способствует формированию

сосредоточенного перепада свободной поверхности потока, на котором происходит разлом ледяных полей и пропуск отдельных льдин в нижний бьеф.

Ранее получены зависимости, позволяющие определять ширину ледобросного фронта, размеры отламывающихся льдин при движении ледяных полей через сосредоточенный перепад на кривой спада перед водосливом [19]. Однако, они получены без учета наклона льдин на перепаде, формы свободной поверхности и поэтому могут применяться в расчетах для льдин, длиной более 30÷50 м.

Анализируя методы расчета разлома льдин на перепаде и пропуска их через гребенку водосливных плотин, можно отметить следующее: существующие зависимости для расчета изгибающих моментов при движении льдин через перепад и зависимости для определения длины отламывающейся части применимы только для льдин длиной вдоль потока не менее 50 м, скорости и траектории движения льда на участке между сосредоточенным перепадом и ледобросным сооружением могут быть определены только по данным экспериментальных исследований. На небольших реках и каналах льдины имеют меньшие размеры. Этот факт следует учитывать. При разработке новых методов расчета разрушения ледяных полей также необходимо рассматривать динамику потока. Создание искусственного перепада будет способствовать успешному пропуску льда за счет того, что льдина, двигаясь через перепад, испытывает напряжения на изгиб. И при превышении предельного значения происходит разлом льдин на более мелкие. При расчетах напряжений, возникающих в ледяном поле необходимо знать архимедовы силы, которые зависят от формы свободной поверхности потока, размера льдин и угла ее наклона [17].

Представляется необходимым исследовать кривые свободной поверхности, образующейся на сосредоточенном перепаде, так как этот вопрос разработан слабо [19] и, как правило, для каждого конкретного случая выполняются специальные лабораторные исследования.

Таким образом, основные цели лабораторных исследований состоят в следующем: определение поля поверхностных скоростей перед водосливом; описание свободной поверхности потока жидкости на перепаде. Состав лабораторных исследований включал: выбор критериев подобия и масштаба моделирования; подбор материала для изготовления образцов искусственного льда; изготовление установки для измерения скоростей; изучение характера движения льда при различных значениях перепада на пороге. Такой комплекс лабораторных исследований дает возможность получить основные параметры, определяющие движение льда на исследуемом участке между сосредоточенным перепадом и основным водосливом.

Методы

Для выполнения поставленных задач были проведены экспериментальные лабораторные исследования с использованием специально изготовленной установки, включающей модель водослива, перед которым для создания сосредоточенного перепада установлен вспомогательный порог (рис. 1).

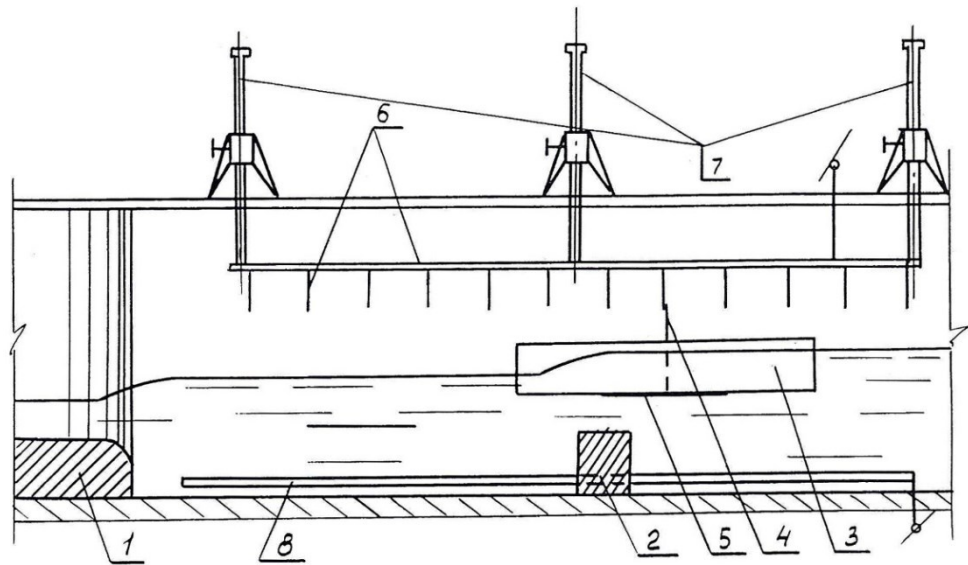


Рис. 1. Конструкция установки для измерения скоростей движения льда

1 – основной водослив; 2 – вспомогательный порог; 3 – льдина; 4 – подвижный контакт;
5 – фолга; 6 – неподвижный контакт; 7 – подъемные устройства;
8 – выровнивающий контакт

Моделирование выполнялось с соблюдением следующих принципов [19,21]:

- геометрическое подобие

$$l_m/l_n = \mu_l = const \quad (1)$$

- динамическое подобие (равенство чисел Фруда)

$$\frac{v_m^2}{gl_m} = \frac{v_n^2}{gl_n} = const \quad (2)$$

- Равенство отношений плотности льда и воды

$$\frac{\rho_{лн}}{\rho_{вн}} = \frac{\rho_{лм}}{\rho_{вм}} = const \quad (3)$$

где l – геометрический размер; v – скорость; μ_l – линейный масштаб; g – ускорение силы тяжести.

Модель водосбросных сооружений выполнялась в масштабе 1:35.

Основываясь на данных по пропуску льда, максимальное расстояние между водосливом и порогом должно быть не более 40 м. Наибольшая глубина в верхнем бьефе, в пересчете на натурные условия составляет 10 м. Минимальное расстояние ограничивается влиянием водослива и составляет величину равную $3H_b$, где H_b – напор на водосливе. Гидравлический перепад составляет от 0, 2 до 3,0 м. Так, например, при возведении Новосибирского гидроузла величина перепада на пороге – 0,2 м; Братского – 0,5 м; Бухтарминского – 2, 75 м.

Результаты

Выполненные экспериментальные исследования показали характер изменения скоростей потока между водосливом и порогом (рис. 2,3,4). Анализ результатов

позволил установить зависимость величины скорости потока от расстояния до порога и величины перепада.

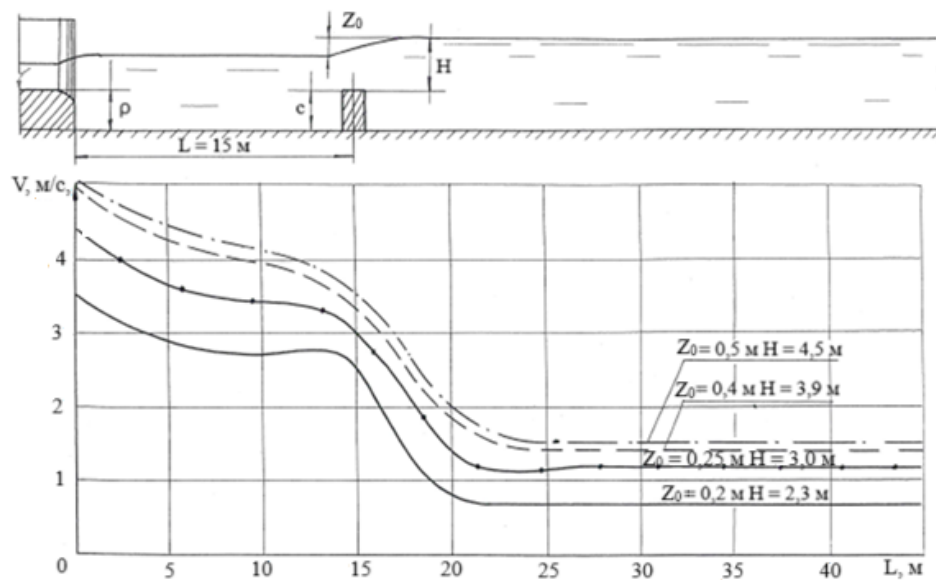


Рис. 2. Изменение поверхностных скоростей потока при $L = 15,0$ м

где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; ρ – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

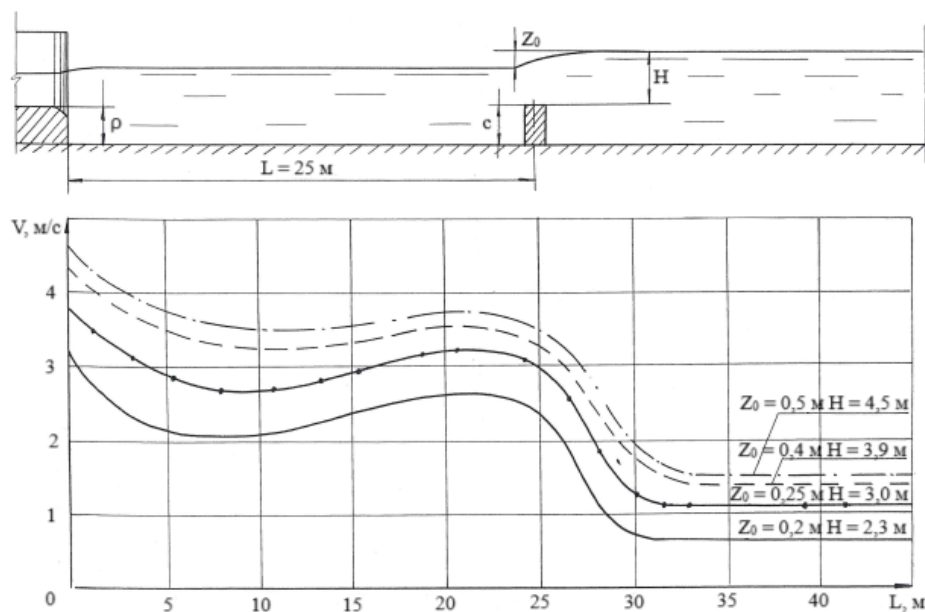


Рис. 3. Поверхностная скорость потока при $L = 25,0$ м

где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; ρ – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

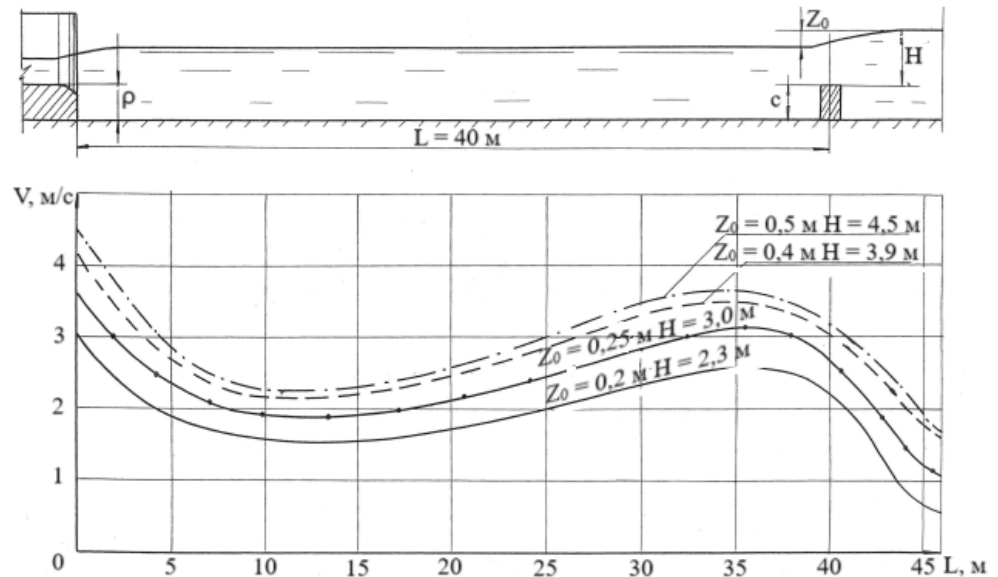


Рис. 4. Поверхностная скорость потока при $L = 40$ м
 где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; p – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

Согласно полученным значениям скоростей потока для описания $v = f(t)$ можно использовать функцию вида:

$$v = v_0 + A(1 - \cos \omega t) \quad (4)$$

где v_0 – скорость движения льда в верхнем бьефе; $A = v_{\max} - v_0$; $v_{\max}$ – максимальное значение скорости льдины при движении через перепад; $\omega = \pi / T$; T – время, в течение которого льдина приобретает скорость от v_0 до $v_{\max}$; t – время отсчета.

Величина A , в основном, зависит от перепада z_0 и длины льдины l . Это позволило описать ее полиномом второй степени

$$A = m_1 z_0^2 + m_2 z_0 + C \quad (5)$$

Для отыскания коэффициентов m_1 , m_2 и C использовался метод наименьших квадратов, в результате чего получена система двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \sum_{i=1}^n z_i^4 + m_2 \sum_{i=1}^n z_i^3 - \sum_{i=1}^n (C - A_i) z_i^2 &= 0 \\ m_1 \sum_{i=1}^n z_i^3 + m_2 \sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n (C - A_i) z_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

совместное решение которых дает возможность определить коэффициенты m_1 , m_2 и C . Значения этих коэффициентов, нанесенные на график (рис. 5), образовали линии, хорошо аппроксимирующиеся уравнениями типа

$$y = ax + b. \quad (7)$$

Конкретно эти коэффициенты могут быть описаны зависимостями

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 0,014l - 2,8 \\ m_2 &= -0,016l + 4,3 \\ C &= -0,0032l + 0,61 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Величина T также зависит от расстояния и перепада:

$$T = f(l, z_0). \quad (9)$$

Иначе можно представить в виде:

$$T = m_3 z_0 + C_1. \quad (10)$$

Коэффициенты m_3 и C_1 определяются по графикам (рис. 6) $C_1 = 0,48L + 0,5$; $m_3 = -0,0032L^2 + 0,245L$

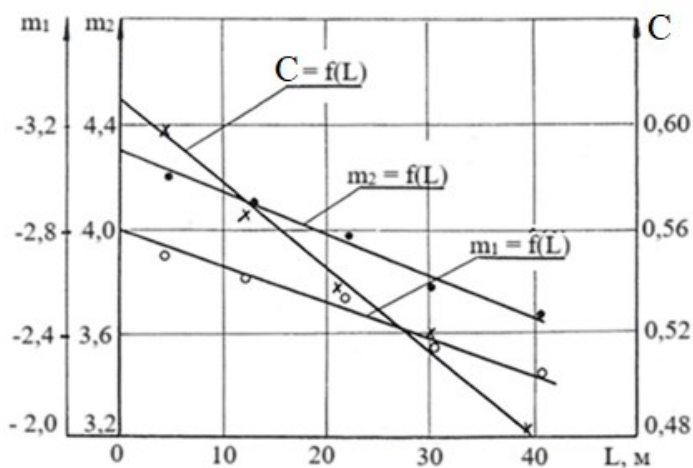


Рис.5. Графики для определения постоянных коэффициентов

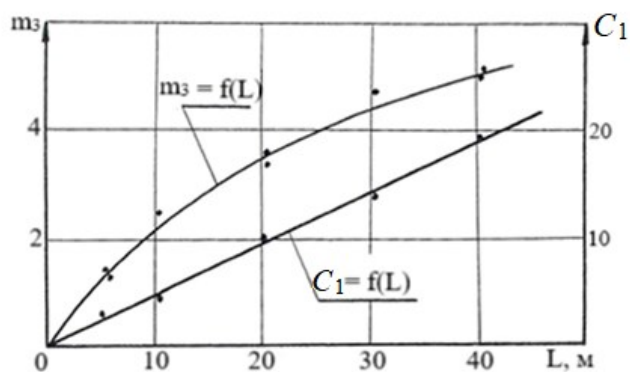


Рис.6. Графики для определения коэффициентов C_1 и m_3

Эмпирические зависимости, используемые для описания кривых свободной поверхности потока, имеют вид [19]:

$$\xi = z_0 (1 - e^{-k\chi}); \quad (11)$$

$$\xi = a\chi^2 + b\chi + c, \quad (12)$$

где ξ и χ - текущие координаты свободной поверхности (рис. 7); z_0 - величина перепада; k , a , b и c' - постоянные коэффициенты, определяемые из опыта.

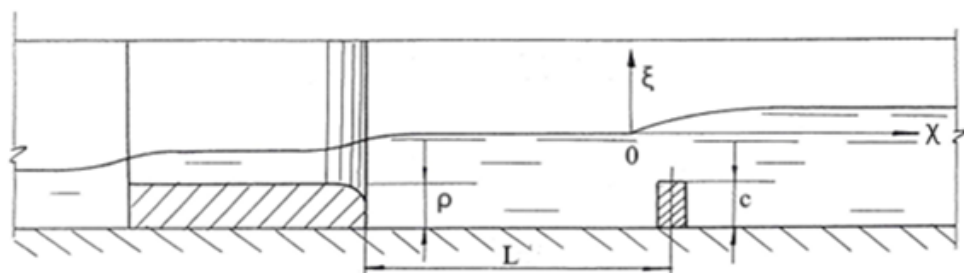


Рис. 7. Схема для построения кривых свободной поверхности

Определение постоянных коэффициентов k , a и b базировалось на экспериментальных данных. Лабораторные исследования позволили установить, какое из двух уравнений (11) или (12) более точно описывает кривую свободной поверхности. Обработка опытных данных при этом проводилась по методу наименьших квадратов. Для определения коэффициента k выражение (11) было

приведено к виду: $1 - \frac{\xi}{z_0} = e^{-k\chi}$, логарифм, от которого записывается как

$$\ln \left(1 - \frac{\xi}{z_0} \right) = -k\chi.$$

Функция ошибки последнего уравнения:

$$f(k) = \min \sum_{i=1}^n \left[-k\chi_i - \ln \left(1 - \frac{\xi_i}{z_0} \right) \right]^2. \quad (13)$$

Дифференцируя функцию $f(k)$ по k и приравняв правую часть к нулю, найдем

$$k = \frac{-\sum_{i=1}^n \chi_i \ln \left(1 - \frac{\xi_i}{z_0} \right)}{\sum_{i=1}^n \chi_i}. \quad (14)$$

где n - количество точек.

Для определения коэффициентов a и b в уравнении (12) проводим аналогичные преобразования:

$$f(a, b) = \min \sum_{i=1}^n \left(a\chi_i^2 + b\chi_i - \xi_i \right)^2. \quad (15)$$

Дифференцируя функцию $f(a, b)$ по a и b и приравняв ее производные к нулю, получим систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a \sum_{i=1}^n \chi_i^4 + b \sum_{i=1}^n \chi_i^3 - \sum_{i=1}^n \xi_i \chi_i^2 &= 0 \\ a \sum_{i=1}^n \chi_i^3 + b \sum_{i=1}^n \chi_i^2 - \sum_{i=1}^n \xi_i \chi_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

совместное решение которых дает возможность определить коэффициенты a и b .

Обсуждение

Выполненный комплекс лабораторных экспериментов и обработка полученных данных позволили получить значения опытных коэффициентов и построить кривые свободной поверхности потока (рис. 8).

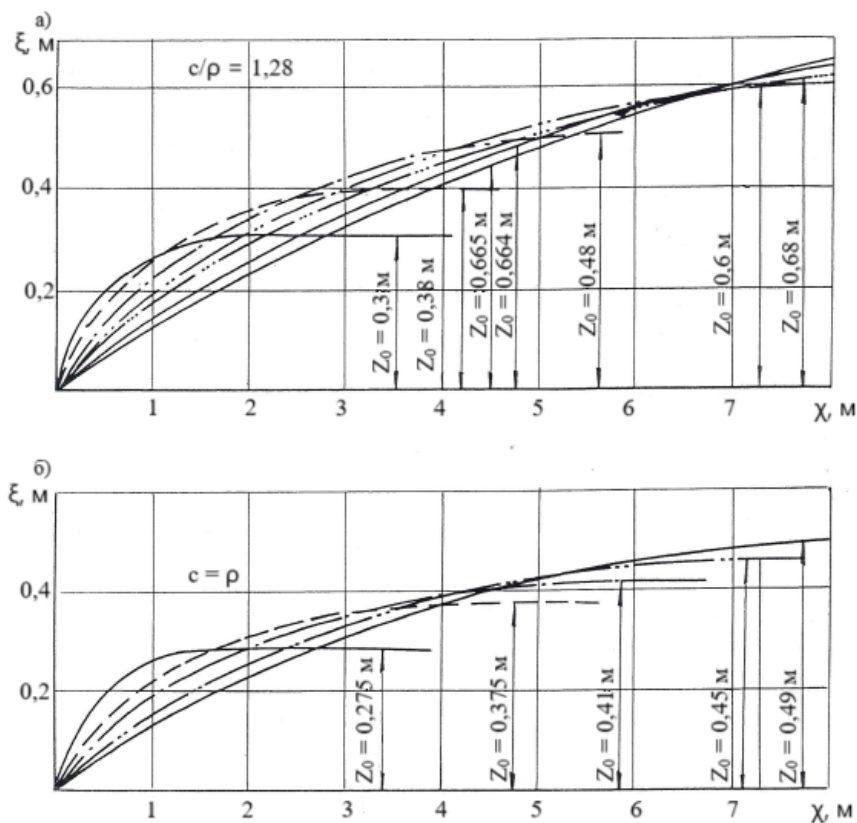


Рис. 8. Формы свободной поверхности потока на сосредоточенном перепаде, построенные по зависимости (12)

Построение свободной поверхности возможно как по уравнению (11), так и по уравнению (12). Чтобы остановиться на одном из них, выполнены статистические расчеты и для каждой кривой определялась среднеквадратическая ошибка:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1}}, \quad (17)$$

где $\varepsilon_i = \xi_i - \xi$; ξ - ордината, вычисленная по уравнению (11) или (12); ξ_i - наблюдаемые значения.

Расчеты показали, что средняя квадратическая ошибка для уравнения (11) находилась в пределах от 9,2% до 16,3%, а для уравнения (12) – от 2,1% до 4,9%, поэтому в дальнейшем для описания кривой свободной поверхности использовалось уравнение (12). Данные лабораторных исследований показали, что коэффициенты a и b изменяются в зависимости от величины перепада z_0 (рис. 8).

Представляя опытные данные в виде квадратичной параболы и используя метод наименьших квадратов, найдены коэффициенты, входящие в уравнение (12):

$$\left. \begin{aligned} a &= -0,28z_0^2 + 0,33z_0 - 0,105 \\ b &= 0,75z_0^2 - 1,56z_0 + 0,8 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Среднеквадратическая ошибка для a составила 2,7%, для b – 3,3%.

Сопоставляя имеющиеся натурные данные скоростей движения льдин перед гребенкой при наличии сосредоточенного перепада [22] с вычисленными по полученным зависимостям, видим вполне удовлетворительное соответствие. Так, например, для Новосибирского гидроузла скорость льда измеренная составила 3,0÷3,5 м/с, а вычисленная 2,4÷3,4 м/с; для Красноярского гидроузла соответственно: 3,5÷4,0 м/с и 3,9÷4,6 м/с

Заключение

В заключении отметим, что специально созданная установка позволила изучить движение льдин на сосредоточенном перепаде. В результате выполненных экспериментов получены данные об изменении поверхностных скоростей между вспомогательным порогом и основным водосливом. Также опытным путем определены коэффициенты, входящие в уравнения для описания формы свободной поверхности потока. Таким образом, уравнения могут быть использованы в расчетах по разлому ледяных полей при движении через водобросные сооружения.

Список литературы

1. Козлов Д. В., Бузин В. А., Фролова Н. Л. и др. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: Монография / Д.В. Козлов, В.А. Бузин, Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, В.Л. Бабурин, Л.С. Банщикова, Горошкова Н.И., А.С. Завадский, И.Н. Крыленко, К.Л. Савельев, К.Д. Козлов, Л.Ф. Бузина. Под общей ред. проф., д.т.н. Козлов Д.В. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. – 348 с.
2. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Планирование пусков в нижний бьеф Новосибирского гидроузла в условиях экстремальных гидрологических ситуаций. – Барнаул, Ползуновский вестник, №4, 2005, с. 95-100.
3. Фомичева Н. Н., Кофеева В. Н. Беззаторный пропуск льда через гидроузлы в эксплуатационный период. Журнал: Научные проблемы водного транспорта / Водные пути, порты и гидротехнические сооружения № 72(3) (2022): DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.296>
4. Бузин В. А., Зиновьев А. Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы): Монография / В.А. Бузин, А.Т. Зиновьев. Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс». – 2009. – 168 с.
5. Савичев О. Г. Расчет заторных уровней речных вод на юге Западной Сибири / О.Г. Савичев. - Известия Томского политехнического университета, Т. 320, №1: Науки о Земле, 2012, с. 152-155.
6. Болгов Н. В., Борщ С. В., Хазиахметов Р. М. Опасные гидрологические явления: методы анализа, расчета и прогнозирования, смягчение негативных последствий / Н.В. Болгов, С.В. Борщ, Р.М. Хазиахметов // Тезисы докладов. VII Всероссийский гидрологический съезд (Санкт–Петербург). – СПб., 2013 – С.6–12.
7. Панфилов Д. Ф. Разрушение ледяных полей под влиянием местных изменений уровня воды // Гидротехническое строительство. 1965. № 12. С. 21–25.
8. Коржавин К. Н. Пропуск льда при строительстве и эксплуатации гидроузлов. М.: Энергия. 1973. 160 с.
9. N. Fomicheva, D. Panov, A. Kalashnikov. Studies of the movement of ice through low-pressure waterworks. Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032072. DOI:10.1088/1742-6596/2131/3/032072
10. Устинов Г. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях Карелии. – Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 3. – Л.: Энергия, 1976, с. 97-100.

11. Сокольников Н. М. Пропуск льда в строительный период через частично возведенные сооружения на реках Сибири. – Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 10. – М.: Энергия, 1964, с. 6-10.
12. Плотников В. М., Бруссе А. Г. Пропуск паводковых расходов р. Хантайки во время строительства через гребень каменнонабросной плотины Усть-Хатанской ГЭС. – Гидротехническое строительство, 1971, «11, с.5-7.
13. Кореньков В. А. Пропуск льда при строительстве Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1979, №8. – С. 25–28.
14. Фомичев Б. С., Кротов С. А. Натурные исследования прочности льда Новосибирского водохранилища и р. Онега / Б. С. Фомичев, С. А. Кротов. – Изв. Вузов, Строительство и архитектура, 1984, №9, с. 83-87.
15. Панфилов Д. Ф. Определение минимальной ширины пролетов плотины из условий пропуска льда. - Гидротехническое строительство, 1971, № 8.
16. Панфилов Д. Ф. Расчет гребенки плотины на пропуск льда // Гидротехническое строительство. 1958, №7. С.32–36.
17. 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, Toronto). May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
18. Fomicheva N. N., Heckert E. V., Modina M. A., Beryozha I. G. Calculation of the fracture of ice fields at a concentrated drop. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021) 012005. DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012005
19. Чугаев Р. Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
20. Готлиб Я. Л. Пропуск льда при строительстве и эксплуатации гидроузлов / Я. Л. Готлиб, В. А. Кореньков, К. Н. Коржавин и др. – М.: Энергия, 1973. – 160 с.
21. Циликин В. Ф. Моделирование пропуска льда при проведении лабораторных гидравлических исследований // Исследования и расчёты заторов льда, вопросы ледотермики и гидродинамики. Л.: Гидрометеоиздат. Вып.192. 1972. С.30-36.
22. Готлиб Я. Л. Пропуск льда через гидротехнические сооружения / Готлиб Я. Л., К.Н. Коржавин, В.А. Кореньков, И.Н. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 184 с.

References

1. Kozlov D. V., Buzin V. A., Frolova H. L. and others. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia: Monograph / D.V. Kozlov, V.A. Buzin, H.L. Frolova, S.A. Agafonova, B.L. Baburin, L.S. Banskchikova, Goroshkova N.I., A.S. Zavadsky, I.N. Krylenko, K.L. Saveliev, K.D. Kozlov, L.F. Buzina. Under the general editorship of Professor, Doctor of Technical Sciences Kozlov D.V., Moscow: Publishing House of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2015. 348 p.
2. Atavin A. A., Zinoviev A. T., Kudishin A. V. Planning of releases into the lower reaches of the Novosibirsk hydroelectric complex in conditions of extreme hydrological situations. Barnaul, Polzunovsky Bulletin, No. 4, 2005, pp. 95-100.
3. Fomicheva N. N., Kofeeva V. N. Lockless passage of ice through waterworks during the operational period. Journal: Scientific problems of water transport / Waterways, ports and Hydraulic structures No. 72(3) (2022): DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.296>
4. Buzin V. A., Zinoviev A. T. Ice processes and phenomena on rivers and reservoirs. Mathematical modeling methods and the experience of their implementation for practical purposes (review of the current state of the problem): Monograph / V.A. Buzin, A.T. Zinoviev. Barnaul: Publishing house of LLC "Five plus". - 2009. – 168 p.
5. Savichev O. G. Calculation of congestion levels of river waters in the south of Western Siberia / O.G. Savichev. - Proceedings of Tomsk Polytechnic University, vol. 320, No. 1: Earth Sciences, 2012, pp. 152-155.
6. Bolgov N. V., Borsch S. V., Khaziakhmetov R. M. Dangerous hydrological phenomena: methods of analysis, calculation and forecasting, mitigation of negative consequences / N.V. Bolgov, S.V. Borsch, R.M. Khaziakhmetov // Abstracts of reports. VII All-Russian Hydrological Congress (Saint Petersburg). Saint Petersburg, 2013– pp.6-12.
7. Panfilov D. F. The destruction of ice fields under the influence of local changes in water level // Hydraulic engineering. 1965. No. 12. pp. 21-25.

8. Korzhavin K. N. The passage of ice during the construction and operation of waterworks. Moscow: Energiya. 1973. 160 p.
9. Fomicheva N., Panov D., Kalashnikov A. Studies of the movement of ice through low-pressure waterworks. Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032072. DOI:10.1088/1742-6596/2131/3/032072
10. Ustinov G. N. Ice difficulties at hydroelectric power plants in Karelia. – Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering, vol. 3. – L.: Energiya, 1976, pp. 97-100.
11. Sokolnikov N. M. Ice passage during the construction period through partially erected structures on the rivers of Siberia. – Proceedings of the Coordination Meetings on Hydrotechnics, vol. 10. Moscow: Energiya Publ., 1964, pp. 6-10.
12. Plotnikov V. M., Brousse A. G. Passage of flood expenses of the Khantaika River during construction through the crest of the Ust-Khatai hydroelectric dam. – Hydraulic engineering construction, 1971, "11, pp.5-7.
13. Korenkov V. A. Ice passage during the construction of the Sayano-Shushenskaya HPP // Hydraulic engineering construction. 1979, No. 8. pp. 25-28.
14. Fomichev B. S., Krotov S. A. Field studies of the strength of the Novosibirsky reservoir and the Onega River / B. S. Fomichev, S. A. Krotov. – Izv. Vuzov, Construction and Architecture, 1984, No. 9, pp. 83-87.
15. Panfilov D. F. Determination of the minimum width of the dam spans from the conditions of ice passage. - Hydraulic Engineering Construction, 1971, No. 8.
16. Panfilov D. F. Calculation of the dam comb for ice passage // Hydraulic engineering. 1958, No. 7. pp.32-36.
17. 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, Toronto). May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
18. Fomicheva N. N., Heckert E. V., Modina M. A., Beryozha I. G. Calculation of the fracture of ice fields at a concentrated drop. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021) 012005. DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012005
19. Chugaev R. R. Hydraulics. – L.: Energoizdat, 1982. – 672 p.
20. Gottlieb Ya. L. Skipping ice during the construction and operation of waterworks / Ya. L. Gottlieb, V. A. Korenkov, K. N. Korzhavin et al. – M.: Energy, 1973. – 160 p.
21. Tsilikin V. F. Modeling of ice passage during laboratory hydraulic studies // Research and calculations of ice jams, issues of icebreaking and hydrodynamics. L.: Hydrometeoizdat. Issue 192. 1972. pp.30-36.
22. Gottlieb Ya. L. Passing ice through hydraulic structures / Gottlieb Ya. L., K.N. Korzhavin, V.A. Korenkov, I.N. Sokolov. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 184 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомичева Няиля Николаевна, доцент кафедры Строительного производства, водных путей и гидротехнических сооружений, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru

Спиренкова Ольга Владимировна, доцент кафедры Строительного производства, водных путей и гидротехнических сооружений, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: olga_spirenkova@mail.ru

Тушина Александра Сергеевна, доцент

Nyailya N. Fomicheva, Associate Professor of the Department of Construction Production, Waterways and Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk region, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru.

Olga V. Spirenkova, Associate Professor of the Department of Construction Production, Waterways and Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novo-Siberian region, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: olga_spirenkova@mail.ru

Alexandra S. Tushina, Associate Professor of

кафедры Строительного производства,
водных путей и гидротехнических
сооружений, к.г.н., доцент, Сибирский
Государственный университет водного
транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099,
Новосибирская область, г. Новосибирск, ул.
Щетинкина, 33,
e-mail: tytylechka@mail.ru

the Department of Construction Production,
Waterways and Hydraulic Engineering,
Candidate of Geographical Sciences, Associate
Professor, Siberian State University of Water
Transport, 630099, Novosibirsk region,
Novosibirsk, Shchetinkina str., 33,
e-mail: tytylechka@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 16.06.2025; published online 20.09.2025.