

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКАХ

М.Г. Умирханов

*Таразский государственный университет имени М.Х. Дулати,
080012, Тараз, ул. Сулейманова, 6, Казахстан; murat-taraz@mail.ru*

Приведены результаты модельных исследований влияния заглубления преграды на вовлечение льдин под нее. В модельных расчетах используется число Фруда.

Ледовые скопления, заторы подныривания, заторы торошения, зажорно-заторные явления, число Фруда

MODEL RESEARCH OF ICE JAMS ON THE RIVERS

M.G. Umirkhanov

Dulati Taraz State University, 080012, Taraz, Sulimanova str., 6, Kazakhstan; murat-taraz@mail.ru

The results of model research of the effect of obstacle deepening on the ice involvement under the obstacle have been presented. The Froude number has been used for model calculations.

Ice aggregates, diving jams, hummocking jams, formation of jamming, Froude number

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большую сложность и многообразие зажорных явлений на реках, можно выделить два основных типа зажорно-заторных процессов.

1. Формирование зажорно-заторных скоплений путем увлечения льдин под кромку – заторы подныривания.

2. Формирование зажорно-заторных скоплений при разрушении ледяного покрова в процессе торошения и сжатия льдин путем подсосов, надвигов и навалов льда – заторы торошения.

В первом случае процесс образования заторных скоплений льда определяется энергией потока, необходимой и достаточной для подныривания льдин и перемещения их под ледяным покровом до участка с пониженными скоростями течения, где формируется заторное скопление. При этом размеры льдин, формирующих заторное скопление, не превышают глубину потока. Образование зажорно-заторных явлений путем вовлечения льда под кромку наблюдается главным образом при подходе к кромке отдельных льдин на участках зарегулированных рек в зоне выклинивания подпора водохранилища, в нижних бьефах ГЭС, а также в случаях ускоренного движения масс льда, поступающих с верхних участков реки при прорыве заторов или вскрытии притоков. Кроме того, этот тип явлений наблюдается на участках рек со значительным разрушением ледяного покрова под влиянием солнечной радиации (Дон, Днепр, Дунай, Амур, Сырдарья и др.).

На реках северных районов наиболее распространено формирование заторов при торошении

льда в процессе общего разрушения ледяного покрова под воздействием статического и динамического сжатия ледяных полей.

Модельные исследования вовлечения шуги и льда под кромку ледяного покрова представляют составную часть изучения процессов зажорозаторообразования на реках и этапом экспериментальной разработки методов гидравлического регулирования транспорта шуги и льда. Модельным методом можно определить условия заноса под ледяной покров льдин разных плановых размеров и толщины при различных гидравлических параметрах потока [Умирханов, 2011].

СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве критериев подобия при моделировании потока обычно используются безразмерные числа Фруда (Fr) и Рейнольдса (Re). Однако одновременно удовлетворить этим критериям невозможно, поэтому при моделировании транзита льда принимается Fr , отражающее соотношение сил тяжести и инерции. Основную трудность при моделировании представляет выбор материала-замениителя льда (МЗЛ). В литературе прослеживается тенденция выбора МЗЛ с удельным весом, близким к удельному весу льда $\gamma = 0,9 \text{ г/см}^3$. Чаще всего в качестве МЗЛ выступает парафин. Между тем несмачиваемость парафиновых пластинок водой в определенной степени влияет на их взаимодействие с преградой и при малых масштабах моделей может вносить значительные искажения в моделируемое явление вовлечения льда под преграду.

Подобный недостаток имеет место и при использовании другого распространенного МЗЛ – древесины различных пород. В настоящее время широкое применение в качестве МЗЛ получили разновидности полистиролов и полиэтиленов.

Канадские ученые, изучавшие явление вовлечения льдин под кромку, связывали критическую скорость ($v_{кр}$) с глубиной (h), характеризуя критический момент числом Фруда $Fr = \frac{v_{кр}}{\sqrt{gh}}$ (g – ускорение свободного падения). По данным Г. Кивисильда, $Fr = 0,08$, по данным Е. Паризе и Р. Хауссер, $Fr = 0,15$. Пытаясь увязать эти величины, Б. Мишель ввел коэффициент пористости ледовых скоплений, образующих преграду, и предложил следующую формулу:

$$Fr = 0,154\sqrt{1-\epsilon}, \quad (1)$$

где ϵ – пористость массы льда перед кромкой. Согласно формуле (1), значения Fr , полученные Г. Кивисильдом и Е. Паризе, Р. Хауссером, могут быть сравнимы при $\epsilon = 0,73$ и $0,05$ соответственно [Кивисильд, 1959; Паризе, Хауссер, 1959; Мишель, 1965].

А.М. Филиппов [1973] проводил моделирование вовлечения льдин под преграду в зависимости от плановых размеров и толщины льдин. Полученный диапазон значений $Fr = 0,06–0,22$.

З.А. Генкин и В.И. Синотин проводили моделирование вовлечения льдин под преграду в автономной области по Рейнольдсу [Синотин, Генкин, 1972]. Исследования показали, что при неизмеримых длине льдин (l) и глубине потока (h) критическая скорость течения, определяющая вовлечение льдин под преграду, зависит от l :

$$v_{кр} > \sqrt{0,035gl},$$

или

$$Fr = \frac{v_{кр}}{\sqrt{gH}} \approx 0,19. \quad (2)$$

В работе [Синотин, Генкин, 1972] изучалось влияние заглупления преграды на подныривание льдин. Результаты исследований приведены для заглуплений (отношение высоты заглупления преграды к толщине льдин) $h/\delta = 0,37, 0,44, 0,62, 0,67$. При $Fr = 0,035$ для указанных значений h/δ происходит вовлечение льдин под кромку ледяного покрова, что не влияет на критическую скорость потока (при котором начинается вовлечение льдин под преграду).

В.Ф. Циликин [1967], рассматривая момент удара льдин о преграду, получил следующее уравнение динамического равновесия льдины:

$$\frac{1}{2}g\rho_{л}l^2 + K_{н}'\rho\delta\frac{v_{кр}^2}{2} - \frac{1}{2}g\rho l^2\delta - K_{н}\delta\rho\frac{v_{кр}^2}{2} = 0, \quad (3)$$

где δ – толщина льдин; $K_{н}$ – коэффициент формы льдины, равный $0,95–1,0$; $K_{н}'$ – коэффициент про-

порциональности, равный $0,95–0,97$; $\rho, \rho_{л}$ – плотность воды и льда соответственно.

Решение уравнения (3) относительно $v_{кр}$ дает формулу для критической скорости в виде

$$v_{кр}^2 = \sqrt{g\frac{\delta(1-\rho_{л}/\rho)}{K_{н}'\delta/l - K_{н}\delta^2/l^2}}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что критическая скорость зависит от толщины и длины льдины [Циликин, 1967; Четырбоцкий, 2005].

Цель настоящей работы – экспериментальное определение влияния заглупления преграды на вовлечение льдин под преграду, при котором происходит увеличение критической скорости потока воды.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная часть работы была выполнена в лотке длиной $8,0$ м и шириной $0,3$ м со стеклянными стенками высотой $0,6$ м. Диапазон изменения скоростей потока на модели составил $0,10–0,35$ м/с. Измерение скоростей производилось с помощью трубки Пито. В качестве льдин в опытах были использованы парафиновые пластинки (удельный вес парафина $0,9$ г/см³). Ледяной покров имитировался погруженной в воду и соприкасающейся со стенками лотка пластиной полистирола шириной $0,3$ м и длиной $1,0$ м. При проведении опытов были использованы пластины длиной $l = 3–12$ см и толщиной $\delta = 0,4–4$ см.

В расчетах глубина воды задавалась в зависимости от плановых размеров пластин ($l = 3–12$ см). При разной глубине потока средняя скорость потока может быть одинаковой, поэтому, проводя одни и те же исследования в разных диапазонах изменения глубин, можно получить определенные значения $Fr = \text{const}$, не согласующиеся между собой.

Так, при заданной высоте заглупления преграды ($h = 2–7$ см), варьировали толщину пластин ($\delta = 0,4–4$ см) и создавали в лотке скорости течения, при которых происходило увеличение критической скорости вовлечения льдин под преграду (для заглупления h/δ). В следующей серии опытов задавали новую высоту заглупления преграды, опять варьировали толщину пластин и создавали критические скорости течения.

На рис. 1 представлен процесс остановки льда перед ледяным покровом и вовлечения льдин под ледяной покров при критической скорости течения потока.

При запуске пластин к преграде осуществлялось их равномерное распределение по всей ширине лотка. При определенной скорости течения в зависимости от высоты заглупления преграды пластины вовлекались под преграду при достижении критической скорости течения. Дальнейшее движение по нижней поверхности преграды вдоль

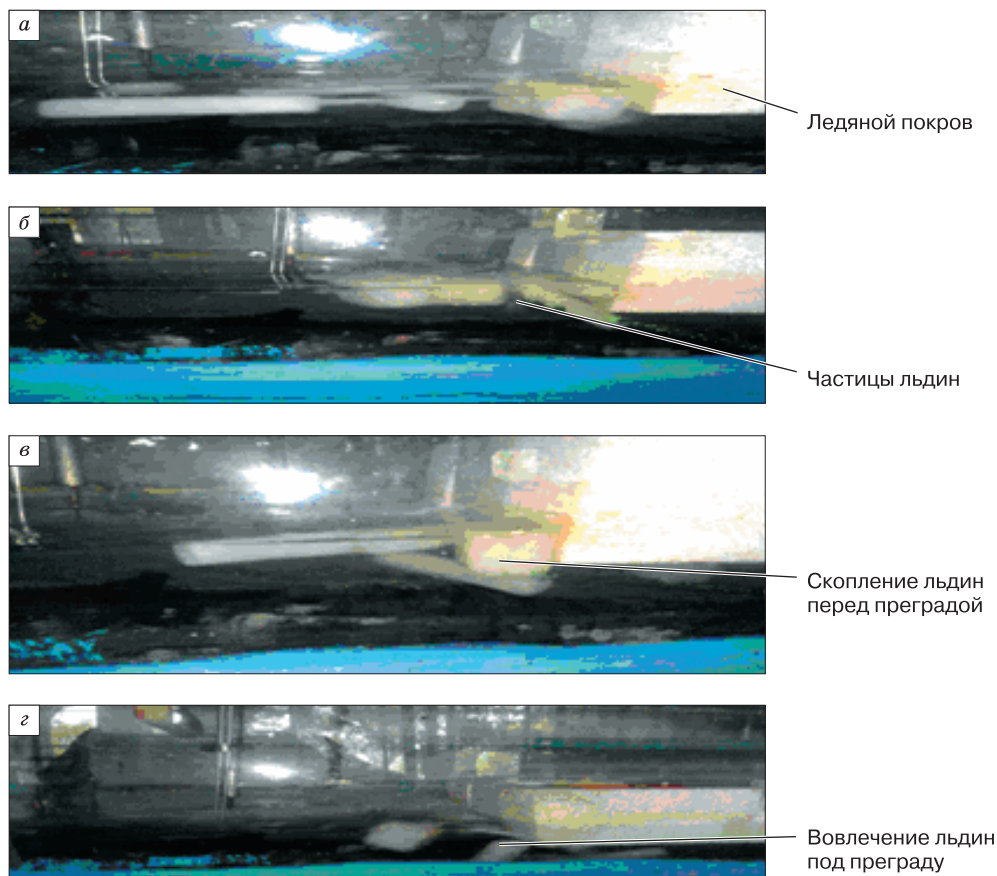


Рис. 1. Вовлечение льдин под кромку преграды:

a – процесс движения частиц льдин к сплошному ледяному покрову; *б* – процесс столкновения частиц льдин с преградой; *в* – процесс скопления частиц льдин перед преградой (при скорости ниже критической); *г* – процесс вовлечения частиц льдин под преграду при критической скорости потока.

лотка происходило многократным опрокидыванием (вращением) пластин. В меньшей мере происходило скольжение пластин по нижней поверхности преграды.

На рис. 2 приведены результаты исследования вовлечения льдин под кромку ледяного по-

крова при критической скорости потока. Видно, что при $h/\delta \geq 6,2$ ($Fr \geq 0,05$, $v_{кр} = 0,12$ м/с) льдины перестают вовлекаться под преграду, и число Фруда уже нельзя использовать для описания этого процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе модельных исследований вовлечения льдин под кромку ледяного покрова варьировались отношения высоты заглибления преграды к толщине пластины ($h/\delta = 6,2; 3,1; 0,89; 0,6$). При отношении высоты заглибления преграды к толщине пластины $h/\delta = 6,2$, критической скорости потока $v_{кр} = 0,12$ м/с и числе Фруда $Fr = 0,05$ льдины перестают вовлекаться под ледяной покров (они скапливаются перед преградой и образуют сплошной ледяной покров). При $h/\delta > 6,2$, $v_{кр} = 0,12$ м/с и $Fr = 0,05$ льдины вовлекаются под кромку преграды, тем самым делают возможным образование зажоров льда посредством остановки льдин под ледяным покровом.

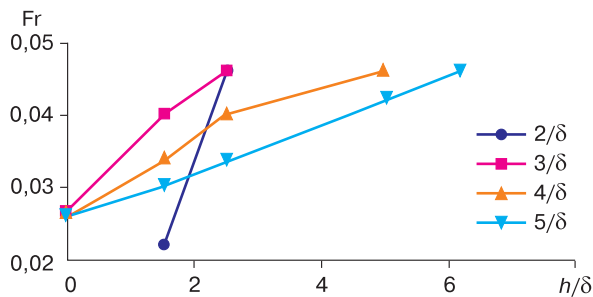


Рис. 2. Влияние заглибления преграды (h/δ) на критическую скорость вовлечения льдин под преграду в зависимости от числа Фруда.

Литература

- Кивисильд Г.** Исследования образования зажоров // Тр. 9-го Конгресса МАГИ. Л., 1959, с. 1–47.
- Мишель Б.** Критерий гидродинамической устойчивости фронтальной кромки ледяного покрова // Тр. 11-го Конгресса МАГИ. Л., 1965, с. 17–24.
- Паризе Е., Хауссер Р.** Образование ледяного покрова на реках // Тр. 9-го Конгресса МАГИ. Л., 1959, с. 209–210.
- Синотин В.И., Генкин З.А.** Исследования подныривания льдин под преграду // Тр. ГГИ, 1972, вып. 192, с. 37–43.
- Умирханов М.Г.** Борьба с заторами в низовьях р. Сырдарья // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2011, т. 264, с. 137–139.
- Филиппов А.М.** Образование заторов и зажоров льда на реках // Тр. ГГИ, 1973, вып. 201, с. 107–114.
- Циликин В.Ф.** Вопросы вовлечения плавающих тел в заглубленные отверстия в условиях плоской и пространственной задач: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1967, 35 с.
- Четырбоцкий А.Н.** Формирование и разрушение ледяного покрова замерзающих морей // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 45–53.

*Поступила в редакцию
6 июня 2013 г.*