

В.А. Бузин, Н.И. Горошкова

ПРОГНОЗ ВНУТРИВОДНОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ В РЕКАХ И НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС

Buzin, V.A. and Goroshkova, N.I.

FORECAST OF FRAZIL ICE FORMATION IN RIVERS AND TAILWATER AT POWER PLANTS

Рассматривается опасное ледовое явление в реках и нижних бьефах ГЭС, развивающиеся в процессе их замерзания – образование внутриводного льда, приводящего к закупорке водозаборов. Излагается методика краткосрочных прогнозов интенсивности внутриводного ледообразования – элемента ледового режима шугоносных рек и нижних бьефов ГЭС, ранее не прогнозировавшегося.

Ключевые слова: замерзание реки, внутриводный лед, шуга, ледовые затруднения, прогноз опасного ледового явления.

The dangerous ice phenomenon – frazil ice formation and subsequent water intake obstruction in rivers and HYDROELECTRIC POWER STATIONS lower reach during water freeze-up – is considered. The technique of frazilization intensity, an element of ice conditions in rivers and HYDROELECTRIC POWER STATION lower reach with frazil ice drift, short-term forecast is presented. Until now this element of ice conditions was not predicted.

Key words: rivers freeze-up, frazil ice, slush ice, ice problems, dangerous ice phenomenon forecast.

Отличительной особенностью процесса замерзания шугоносных участков рек, включая нижние бьефы высоконапорных ГЭС, является образование внутриводного льда – различных ледяных кристаллов (пластинчатых, круглых, чечевицеобразных и др.), а также их скопления в виде губчатой непрозрачной массы, находящейся в толще воды, на подводных предметах (глубинный лед) или на дне (донный лед).

Помехи, вызываемые образованием внутриводного льда, обусловлены способностью кристаллов льда примерзать к металлу, обладающему гидрофильными свойствами, и прочно удерживаться на его поверхности. Намерзая на решетках водозаборов, внутриводный лед нарушает этим нормальное водоснабжение. Отверстия водозаборов остаются забитыми внутриводным льдом в течение нескольких дней, что нарушает нормальное функционирование хозяйственных объектов.

К настоящему времени известны многочисленные теоретические исследования процесса ледообразования на шугоносных реках [1, 2, 3, 7, 11, 13, 14], в результате которых установлено, что необходимыми условиями образования внутриводного льда в водных потоках являются переохлаждение воды ниже 0° , наличие центров кристаллизации и интенсивный отвод тепла, выделяющегося при ледообразовании, т. е. наличие турбулентного перемешивания масс воды. Также установлено, что значительное переохлаждение воды (до $-0,1^{\circ}\text{C}$) может

происходить при активном перемешивании, которое наблюдается при скорости течения более 0,6 м/с и больших теплопотерях ($S > 200 \text{ Вт/м}^2$).

Вопрос о переохлаждении детально изучался при исследованиях кристаллизации воды, выполненных В.А. Рымшей и Р.В. Донченко [11]. Для оценки интенсивности внутриводного ледообразования ими предложена расчётная формула, описывающая распределение тепла, выделяющегося при образовании льда на поверхности и по глубине потока. Оно характеризуется соотношением между теплоотдачей водной поверхности и интенсивностью турбулентного перемешивания водной массы. Количественно данное соотношение выражается параметром P_z , представляющим собой количество теплоты, выделяющейся при кристаллизации переохлажденной воды объемом $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ на глубине z :

$$P_z = \frac{S}{\sqrt{\lambda_r m}} \left(\frac{ch[(h-z)/\sqrt{\lambda_r m}] - k \cdot ch(z/\sqrt{\lambda_r m})}{sh(h/\sqrt{\lambda_r m})} \right), \quad (1)$$

где S – теплоотдача с водной поверхности; λ_r – коэффициент турбулентной теплопроводности воды; m – эмпирический параметр, характеризующий отношение температуры переохлажденной воды к теплоте, выделяющейся при ее кристаллизации; h – глубина потока; z – глубина, отсчитываемая от поверхности; k – коэффициент, характеризующий отношение прихода тепла через дно водотока к теплоотдаче с водной поверхности.

При $z \rightarrow 0$ формула (1) принимает вид

$$P_o = S / \sqrt{\lambda_r m}. \quad (2)$$

Условие $P_o \approx S$ (слабое турбулентное перемешивание воды) отвечает спокойному и быстрому замерзанию реки путем образования на поверхности воды ледяной корки. При интенсивном перемешивании воды распределение P_z по глубине близко к равномерному распределению, т.е. $P_o \ll S$, и лёд образуется во всей водной толще, а процесс замерзания водотока носит затяжной характер.

Расчётная формула В.А. Рымши и Р.В. Донченко обоснована результатами лабораторных и натурных исследований и рекомендована для использования в расчетах характеристик ледовых явлений при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на реках и каналах [9]. После небольших преобразований она может быть применена и для прогноза интенсивности образования внутриводного льда. Так, уравнение (2) можно представить следующим образом:

$$\alpha = \frac{P_o}{S}, \quad (3)$$

где α – доля теплоотдачи с водной поверхности, в результате которой образовался поверхностный лед. Тогда для средней интенсивности образования внутриводного льда в водном потоке глубиной h можно записать:

$$I_h = (1 - \alpha) \frac{S}{Lh}, \quad (4)$$

где I_h в $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$; L – удельное тепло ледообразования, $L = 33,3 \cdot 10^4$ Дж/кг. В случае суточного интервала времени ледообразования уравнение (1) принимает вид

$$I_h = 0,2595(1 - \alpha) \frac{S}{h}. \quad (5)$$

Р.А. Нежиховским [8] показано, что на реках, протекающих в пределах от 58 до 62° северной широты, потери тепла с водной поверхности в конце осени – начале зимы достаточно точно рассчитываются по формуле

$$S = -24,23\theta, \quad (6)$$

где S – среднесуточные потери тепла, Вт/м^2 ; θ – среднесуточная температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

После подстановки (6) в (5) получаем следующую формулу для расчёта целей прогноза средней за сутки интенсивности внутриводного ледообразования в реках и нижних бьефах ГЭС в пределах северной широты от 58 до 62° .

$$I_h = -6,29(1 - \alpha) \frac{\theta}{h}. \quad (7)$$

Установлено, что доля поверхностного теплового потока, приводящего к образованию поверхностного льда

$$\alpha = -0,0004 \frac{\theta}{A}. \quad (8)$$

Значение коэффициента турбулентного обмена (вязкости) водных масс, необходимое для ее определения, рассчитывается по формуле В.М. Маккавеева [7]

$$A = \frac{ghV}{C(0,7C + 6)}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; V – скорость течения, м/с ; C – коэффициент Шези.

Формула (7) позволяет рассчитать среднюю за сутки интенсивность ледообразования по данным об уровне воды и температуре воздуха. Для прогноза нужно иметь данные метеопрогноза с заблаговременностью 5 суток. По уровню Z на дату составления прогноза по кривой $Q(Z)$ определяется расход воды, который используется в прогнозе интенсивности внутриводного ледообразования.

Предварительным этапом прогнозирования интенсивности образования внутриводного льда является построение вспомогательных графиков связи $Q = f(Z)$, $h = f(Q)$, $B = f(Q)$, $V = f(Q)$, $C = f(Q)$ и $A = f(Q)$. Кроме того, устанавли-

вается зависимость потерь тепла с водной поверхности от температуры воздуха.

Выпуск прогноза приурочивается к дате устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. На эту дату по данным измерений на гидрологическом посту температуры воды ($\theta_в$) и уровня (Z) определяются средние за сутки значения Z и $\theta_в$. По уровню Z с кривой $Q = f(Z)$ снимается соответствующее ему значение расхода воды. Далее по кривым $h = f(Q)$ и $B = f(Q)$ устанавливаются значения глубины (h) и ширины (B) реки при расходе Q . Затем по данным метеопрогноза с заблаговременностью 5 суток рассчитываются средние теплотери с водной поверхности (S_{cp}) и прогнозируется дата начала ледовых явлений:

$$D_{л} = D_{0^{\circ}\text{C}} + \frac{c\rho h\theta_в}{86400S_{cp}}, \quad (10)$$

где $D_{0^{\circ}\text{C}}$ – дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $c = 4190\text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ – удельная теплоемкость воды; $\rho = 1000\text{ кг/м}^3$ – плотность воды.

Следующим этапом является прогноз расхода воды на дату $D_{л}$. Этот расход достаточно тесно связан с расходом на дату $D_{0^{\circ}\text{C}}$. Связь между ними характеризуется коэффициентами корреляции от 0,7 до 0,8. Она имеет следующее аналитическое выражение:

$$Q_{л} = Q_{0^{\circ}\text{C}} e^{k\tau}, \quad (11)$$

где k – коэффициент, зависящий от погодных условий в период замерзания реки; $\tau = D_{л} - D_{0^{\circ}\text{C}}$.

Коэффициент k определяется за период от даты начала устойчивого тренда расхода воды до даты выпуска прогноза (дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Последним этапом прогноза является определение по кривым $h = f(Q)$ и $A = f(Q)$ через расход $Q_{л}$ значений h и A и расчет по формуле (7) интенсивности образования внутриводного льда.

Для нижних бьефов ГЭС, где внутриводный лед образуется в течение всей зимы на нижнем участке приплотинной полыньи, интенсивность внутриводного ледообразования прогнозируется ежедневно, для чего ежедневно определяется положение створа нулевой температуры воды

$$L_{0^{\circ}\text{C}} = \frac{Q_{\text{ГЭС}} c \rho \theta_{\text{в, ГЭС}}}{B S_{cp}}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{ГЭС}}$ – сбросной расход гидроузла; B – ширина бьефа; $\theta_{\text{в, ГЭС}}$ – температура воды, сбрасываемой ГЭС.

Описанная выше прогностическая схема реализована на примере одной из

самых шугоносных рек России: реки Нева, которая имеет сложный и во многом отличный от других рек режим, обусловленный неустойчивым характером погоды зимой и регулированием стока воды в ней глубоководным Ладожским озером. Образование внутриводного льда в начале зимы является неотъемлемой частью процесса замерзания Невы. Намерзая на решетках водозаборов, он нарушает этим нормальное водоснабжение основных потребителей воды Невы: промышленности Санкт-Петербурга, теплоэнергетики и коммунального хозяйства города и многочисленных городков и поселков Ленинградской области, расположенных вблизи реки. В последние годы из-за теплового загрязнения Невы и, возможно, в связи со строительством защитных сооружений в Невской губе и изменением климата, на реке в начале зимы все дольше сохраняется ледостав с полыньями, что благоприятствует внутриводному ледообразованию.

Выполненные расчеты интенсивности внутриводного ледообразования в Неве на участке 17–45 км от устья реки показали, что максимальное значение I_h равно $7,0 \text{ кг/м}^3\cdot\text{с}$, а минимальное – $0,7 \text{ кг/м}^3\cdot\text{с}$. Для прогноза было выведено простое уравнение

$$I_h = 0,397Z_{\text{Петр}} - 0,449\theta_{\text{мин}} + 0,226 \quad (13)$$

где $Z_{\text{Петр}}$ – уровень воды у ст. Петрокрепость на дату устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (м БС); $\theta_{\text{мин}}$ – минимальная температура по метеопрогнозу в течение ближайших 5 суток ($^\circ\text{C}$).

Процессы ледообразования и формирования ледяного покрова в нижних бьефах гидроузлов определяются режимом работы ГЭС, расходом и температурой воды, поступающей в нижний бьеф, а также теплопотерями и гидравлическими условиями [5, 6, 12]. Внутриводный лёд образуется здесь в течение всего зимнего периода в полынье, размеры которой изменяются под влиянием режима работы ГЭС и условий теплообмена.

Расход воды определяет соотношение интенсивностей образования поверхностного и внутриводного льда в потоке. Чем больше расход, тем больше льда образуется внутри водного потока и меньше на его поверхности. В нижних бьефах высоконапорных ГЭС в большинстве лет зимний расход воды достаточно велик, и участок бьефа, находящийся в зоне перемещения кромки льда, отличается интенсивным образованием внутриводного льда.

Расчеты интенсивности внутриводного ледообразования в нижних бьефах пяти ГЭС: Усть-Каменногорской на р. Иртыш, Новосибирской на р. Обь, Красноярской на р. Енисей, Богучанской на р. Ангара и Зейской на р. Зея показали, что для участков бьефов, находящихся в зоне перемещения кромки льда, максимальное значение I_h равно $77 \text{ кг/м}^3\cdot\text{с}$, а минимальное – $8 \text{ кг/м}^3\cdot\text{с}$. Оказалось, что для нижних бьефов высоконапорных гидроузлов величина I_h слабо зависит от расхода воды. Интенсивность образования льда (как поверхностного, так и внутриводного) в нижних бьефах высоконапорных ГЭС определяет, в основном, температура воздуха в период его замерзания. Наибольшая интенсивность этого процесса приходится на дату минимальной температуры. В результате

выполненных расчетов установлена общая прогностическая зависимость для нижних бьефов высоконапорных гидроузлов Сибири (рис. 1).

Установленная зависимость интенсивности внутриводного ледообразования от температуры воздуха может быть положена в основу системы контроля и прогнозирования ледообразования в нижних бьефах высоконапорных гидроузлов в Сибири.

Для нижних бьефов ГЭС, как уже отмечалось, интенсивность внутриводного ледообразования прогнозируется ежедневно для участка ниже створа нулевой температуры воды. Исходными данными для прогноза являются средняя суточная температура воздуха по метеопрогнозу с заблаговременностью 5 суток, сбросной расход воды ($Q_{ГЭС}$) на дату выпуска прогноза, а также сведения о положении створа нулевой изотермы и кромки ледяного покрова. Расход воды в расчётном створе определяется по связи $Q = f(Q_{ГЭС})$ с учетом времени добегания от ГЭС. Положение створа нулевой изотермы устанавливается ежедневно путём измерения температуры воды или по зависимости $L_{0^{\circ}C} = f(Q_{ГЭС}, \theta_{ГЭС}, \theta)$. Затем по данным метеопрогноза на 5 суток вперед прогнозируется в створе дата начала ледовых явлений по формуле

$$D_{л} = D_{0^{\circ}C} - 2,09 \cdot 10^{-6} \frac{c\rho h\theta_{в}}{\theta_{ср}}. \quad (14)$$

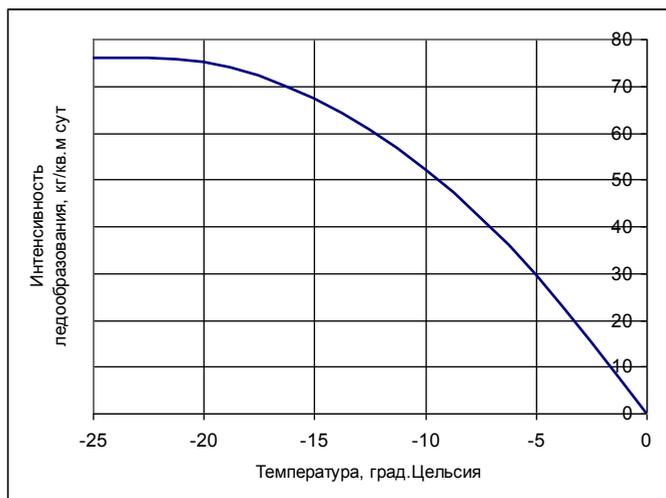


Рис. 1. Зависимость интенсивности внутриводного ледообразования от температуры воздуха на участке нижнего бьефа между створами начала переохлаждения воды и полного покрытия воды шугой

Положение кромки устанавливается по характерному ходу уровня воды у неё: сначала резкому спаду, а затем подъёму воды. Уровни воды в нижнем бьефе определяются по данным наблюдений на гидрологических постах с автоматизированным измерением уровня Z , и выявляется прогностическая зависи-

мость. $L_n = f(Q_{ГЭС}\theta_{ГЭС}, \sum \theta)$.

С учётом перечисленных выше данных и метеопрогноза по рис. 1 прогнозируется интенсивность внутриводного ледообразования.

Разработанная на теоретической основе методика краткосрочного прогноза ранее не прогнозировавшейся характеристики замерзания шугоносных рек [10] достаточно универсальна и даёт возможность предсказания интенсивности внутриводного ледообразования даже при ограниченном числе лет наблюдений. Точность прогнозов можно оценить только по материалам натурных исследований прогнозируемого явления. К сожалению, систематические наблюдения за многими важными характеристиками процесса замерзания рек не ведутся и, в частности, за интенсивностью образования внутриводного льда. На сегодня количественных данных об этой характеристике очень мало, они носят отрывочный характер. Установленные расчетные зависимости и рассчитанные значения I_h всё же дают представление о диапазоне интенсивности внутриводного ледообразования в реках и нижних бьефах ГЭС и могут использоваться не только для прогнозов, но и, например, при проектировании противообледенительных устройств на водозаборах.

Литература

1. *Абраменков Н.М.* Моделирование процесса замерзания шугоносных рек // Труды САННИИ, 1984, вып. 101(182).
2. *Барышников Н.Б.* О некоторых проблемах гидрологии // Уч. зап. РГГМУ, 2007, № 5, с. 9-13.
3. *Бузин В.А., Копалиани З.Д.* Наводнение на реках России при современных тенденциях в изменении климата // Уч. зап. РГГМУ, 2007, № 5, с. 43-55.
4. *Бужина Л. А.* Распределение по размерам кристаллов внутриводного льда в турбулентном потоке // ДАН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967, т. 3, вып. XI, с. 58-65.
5. *Готлиб Я. Л., Донченко Р.В., Пехович А.И., Соколов И.Н.* Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 200 с.
6. *Ляпин В.Е., Разговорова Е.Л., Трегуб Г.А., Шаталова И.Н.* Возможности регулирования ледотермического режима нижних бьефов высоконапорных ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986, т. 188, с. 5-13.
7. *Маккавеев В.М.* Теория процессов перемешивания при турбулентном движении свободных потоков и вопросы зимнего режима рек // Записки ГГИ, 1931, т. V, с. 75-117.
8. *Нежиховский Р. А.* Расчет и прогноз стока шуги и льда в период замерзания рек // Труды ГГИ, 1968, вып. 103, с. 18-26.
9. *Рекомендации по расчету ледовых явлений и пропускной способности каналов в зимний период эксплуатации.* – Л.: изд. ГГИ, 1987. – 40 с.
10. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* – Л.: Гидрометеоздат, 1989, вып. 3. – 168 с.
11. *Рышиа В.А., Донченко Р.В.* Метод расчета (прогноза) условий образования внутриводного льда // Труды ГГИ, 1962, вып. 93, с. 52-67.
12. *Трегуб Г.А.* Метод расчета длины полыньи в нижних бьефах ГЭС / В кн.: Мат-лы конф- и совещ- по гидротехнике. – Л., 1984, с. 18-26.
13. *Michel B.* Ice accumulations at freeze-up or break-up. – In: IAHS Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, 1978, part. 2, p. 301-318.
14. *Osterkamp T.E.* Frazil-ice formation: a review // J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1978, 104, № 9, p. 1239-1255.