

Гидротехническое строительство

УДК 556.555.5+556.535.5:627.8

Д. В. КОЗЛОВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

К. Л. САВЕЛЬЕВ

ОАО «Мособлгидропроект», Дедовск

ЛЕДОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩА КРАСНОГОРСКОГО ГИДРОУЗЛА НА РЕКЕ ИРТЫШ

В работе представлен расчет ледотермического режима участка реки Иртыш и водохранилища проектируемого Красногорского гидроузла. Выполнены расчеты: температуры воды в период открытой водной поверхности, скорости продвижения кромки льда в период осеннего ледохода, толщины льда, образования полыньи в нижнем бьефе гидроузла и оценки наивысших заторных уровней в зоне выклинивания подпора в период весеннего ледохода.

Ледотермический режим, Красногорский гидроузел на реке Иртыш, скорость продвижения кромки льда, нижний бьеф, выклинивание подпора, водосливные плотины, толщина льда.

There is given an estimation of the ice-thermal regime of a part of the river Irtysh and water reservoir of the Krasnogorsk hydraulic works which is under projection. Estimations were fulfilled of the water temperature in the period of the open water surface, speed of ice edge movement in the period of fall ice drift, ice thickness, formation of ice hole in the lower pond and assessment of the highest jam levels in the zone of support pinching-out in the period of spring ice movement.

Ice-thermal regime, the Krasnogorsk hydraulic works on the river Irtysh, speed of the ice edge movement, lower pond, support pinching-out, weir dams, ice thickness.

Красногорское водохранилище будет образовано Красногорским гидроузлом на реке Иртыш (1813 км от устья). В состав основных гидротехнических сооружений Красногорского гидроузла на

реке Иртыш входят лево- и правобережная бетонные водосливные плотины, судовой шлюз и земляная плотина.

Температура воды рассчитана при переменном по длине реки (водохрани-

лица) коэффициенте теплоотдачи от водной поверхности в атмосферу; толщину льда для реки и водохранилища вычисляли в период ледостава по средним многолетним данным и на всем участке водного объекта от створа проектируемого гидроузла до места предполагаемого выклинивания кривой подпора. В методе расчета авторы показали влияние теплообмена воды и льда, что, как правило, не учитывается в общепринятых методиках инженерных расчетов толщины льда. График зависимости кривой заторных уровней в зоне выклинивания подпора от расхода воды получен для широкого диапазона расходов. Длина полыньи в нижнем бьефе гидроузла рассчитана на основе гидрологических и метеорологических исходных данных.

Методика расчета. Температуру воды в период открытой водной поверхности для каждого расчетного участка определяли по формуле [1]

$$t = (t_0 - \vartheta_s) \exp\left(-\frac{\alpha_1 L}{c \rho h V}\right) + \vartheta_s, \quad (1)$$

где t – средняя температура воды в конечном створе расчетного участка, °С; t_0 – средняя температура воды в начальном створе расчетного участка, °С; ϑ_s – эквивалентная температура окружающей среды, °С; α_1 – коэффициент теплоотдачи от поверхности воды к атмосфере, Вт/м²·К; L – длина расчетного участка, м; c – удельная теплоемкость воды, равная 4 200 Дж/кг·К; ρ – плотность воды, равная 1 000 кг/м³; h – средняя глубина расчетного участка, м; v – средняя скорость расчетного участка, м/с.

Расчет скорости наступления кромки льда проведен по средним многолетним данным метеостанции города Омска и водпостам на реке Иртыш: село Покрово-Иртышское, деревня Новая Станица, город Омск и село Красноярка –

$$v_{кр} = \sum_{j=1}^{12} L_j / \tau_{кр}, \quad (2)$$

где L_j – длина расчетного участка, м; j – номер расчетного участка; $\tau_{кр}$ – время прохождения кромки льда на рассматриваемом участке [2];

$$\tau_{кр} = (\bar{\tau}_n - \bar{\tau}) \frac{2h_n \sigma \rho_{ш}}{\alpha_1 \vartheta_s}, \quad (3)$$

где h_n – начальная толщина льда, м; σ – удельная теплота фазового перехода (ледообразования), равная 3,35·10⁵ Дж/кг; $\rho_{ш}$ – плотность шуги, равная 650 кг/м³; $\bar{\tau}$, $\bar{\tau}_n$ – безразмерные параметры, определяемые по [2] и характеризующие время наступления кромки льда.

Расчет средней многолетней толщины льда был проведен по средним многолетним данным метеостанции города Омска и водпоста города Омска и осуществлялся путем решения обыкновенного дифференциального уравнения [1], с расчетным суточным интервалом:

$$L_v \frac{dh_{л}}{d\tau} = \frac{t_k - \vartheta_s}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{h_{л}}{\lambda_{л}} + \frac{h_c}{\lambda_c}} - S_{в-л}, \quad (4)$$

где $h_{л}$, h_c – толщина ледового покрова и снега соответственно, м; τ – время, с; $\lambda_{л}$, λ_c – коэффициент теплопроводности льда и снега, для льда – 2,22 Вт/м·К для снега подбирается экспериментально; t_k – температура кристаллизации воды, равная 0 °С; $\vartheta_{эл}$ – эквивалентная температура окружающей среды надо льдом [1]; α_s – коэффициент теплоотдачи от поверхности льда (снега) в атмосферу [1], Вт/м²·К; L_v – объемная теплота ледообразования воды, равная 207 080 000 Дж/м³; $S_{в-л}$ – интенсивность теплового потока от воды к нижней поверхности льда, Вт/м², которая определялась по формуле

$$S_{в-л} = S_d + S_{дэ}, \quad (5)$$

где $S_{дэ}$ – интенсивность теплового потока за счет диссипации механической энергии воды [1], Вт/м²; S_d – тепловой поток от дна русла [1], Вт/м².

Наивысший заторный уровень в зоне выклинивания подпора определяли по формуле

$$Z_3 = Z - h - h_3, \quad (6)$$

где Z_3 – наивысший заторный уровень в зоне выклинивания подпора водохранилища, м БС; Z – уровень свободной поверхности, свободной от льда в зоне выклинивания подпора водохранилища, м БС (определяли по кривой подпора в створе около села Розовка); h – средняя глубина водохранилища в створе у села Розовка при свободной от льда поверхности, м (определяли как отношение площади живого сечения водохранилища к его ширине); h_2 – средняя глубина водохранилища в створе у села Розовка при покрытой льдом поверхности, м.

Глубину h_3 определяли из решения уравнений [3]:

$$h_3 = \frac{Q}{B_3 R_3^{2/3} I_3^{1/2}}; \quad (7)$$

$$I_3 = \frac{Q n_{пр}}{B R_3^{2/3}} \sqrt{\frac{k_n}{2h_{лр} k_{л} L_b}}, \quad (8)$$

где L_b – длина реки выше створа, принимаемая равной 80...100 B_3 , м; $h_{лр}$ – толщина льда в реке на конец ледостава, м; k_n – коэффициент густоты ледохода (определяется по результатам визуальных наблюдений за ледоходом; при отсутствии данных наблюдений за ледоходом $k_n \approx 0,7...0,8$); $k_{л}$ – коэффициент использования емкости водохранилища (в зависимости от залесенности пойм: 0,25 – при сплошной залесенности и 0,75...0,80 – при малозаросших поймах); I_3 – средний уклон поверхности на заторном участке; Q – расход воды, м³/с; R_3 – средний гидравлический радиус заторного участка

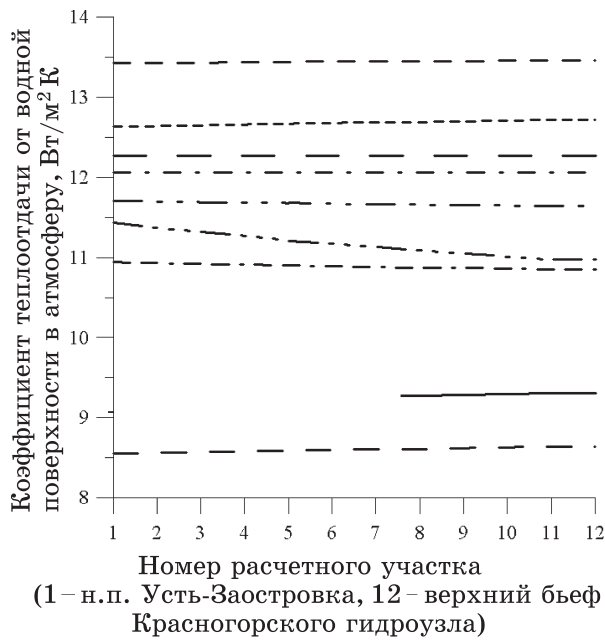


Рис. 1. Коэффициент теплоотдачи от водной поверхности в атмосферу в период открытой водной поверхности на различных участках водохранилища: — апрель (II); — — апрель (III); - - - май; - - - июнь; — — июль; - - - август; - - - сентябрь; - - - октябрь; - - - ноябрь (I)

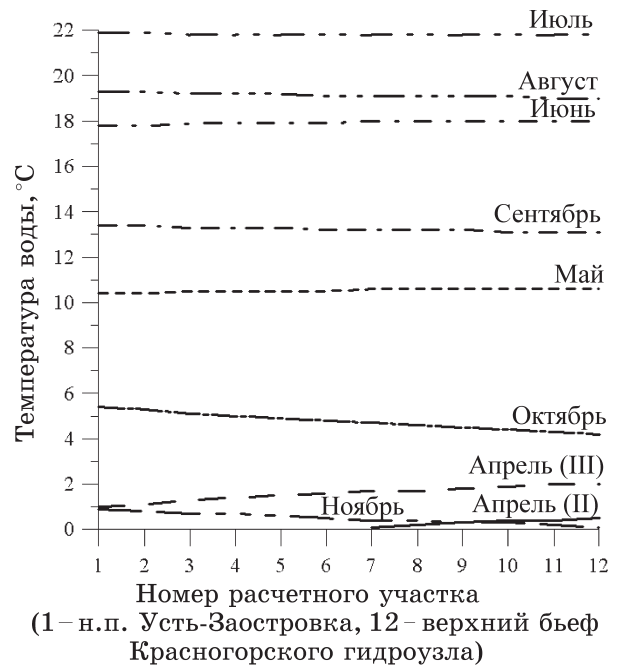


Рис. 2. Температура воды в период открытой водной поверхности на различных участках водохранилища

водохранилища, м; $n_{пр}$ – приведенный коэффициент шероховатости русла и нижней поверхности льда, с/м^{0,33}; B_3 – средняя ширина водохранилища заторного участка, м.

Расчет длины полыньи в нижнем бьефе гидроузла был проведен на основе рекомендаций [2].

Результаты расчета. На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчета коэффициента теплоотдачи от водной поверхности в воздух и температуры воды при открытой водной поверхности, полученной по формуле (1). Скорость продвижения кромки льда для реки составит 0,40 м/с, для водохранилища – 1,24 м/с.

На рис. 3 представлены изолинии значений средней многолетней толщины льда, для расчета которой использовалось дифференциальное уравнение (4). По рис. 3 можно провести сравнение толщины льда с уче-

том и без учета теплообмена воды со льдом. Пунктирные линии на рис. 3 показывают толщину льда, определенную при условии отсутствия теплообмена воды со льдом.

На рис. 4 показаны заторные уровни в зоне выклинивания подпора и уровни свободной ото льда поверхности воды при различных расходах воды, различных коэффициентах плотности ледохода $k_{л}$, коэффициентах использования емкости водохранилища $k_{и}$ и различной длине верхнего участка реки L , с которого поступает лед.

В табл. 1 представлены заторные уровни и уровни поверхности воды, свободной ото льда в зоне выклинивания подпора, при различной обеспеченности.

Следует отметить, что максимальные расходы воды при весеннем

Таблица 1

$P, \%$	Максимальные расход воды весеннего ледохода, м ³ /с	Заторный уровень воды, м БС	Уровень свободной ото льда водной поверхности, м БС	Отметка выхода воды на пойму, м БС
0,5	2730	79,49...79,67	75,87	76,47
1	2660	79,34...79,52	75,77	
3	2520	78,81...79,17	75,61	

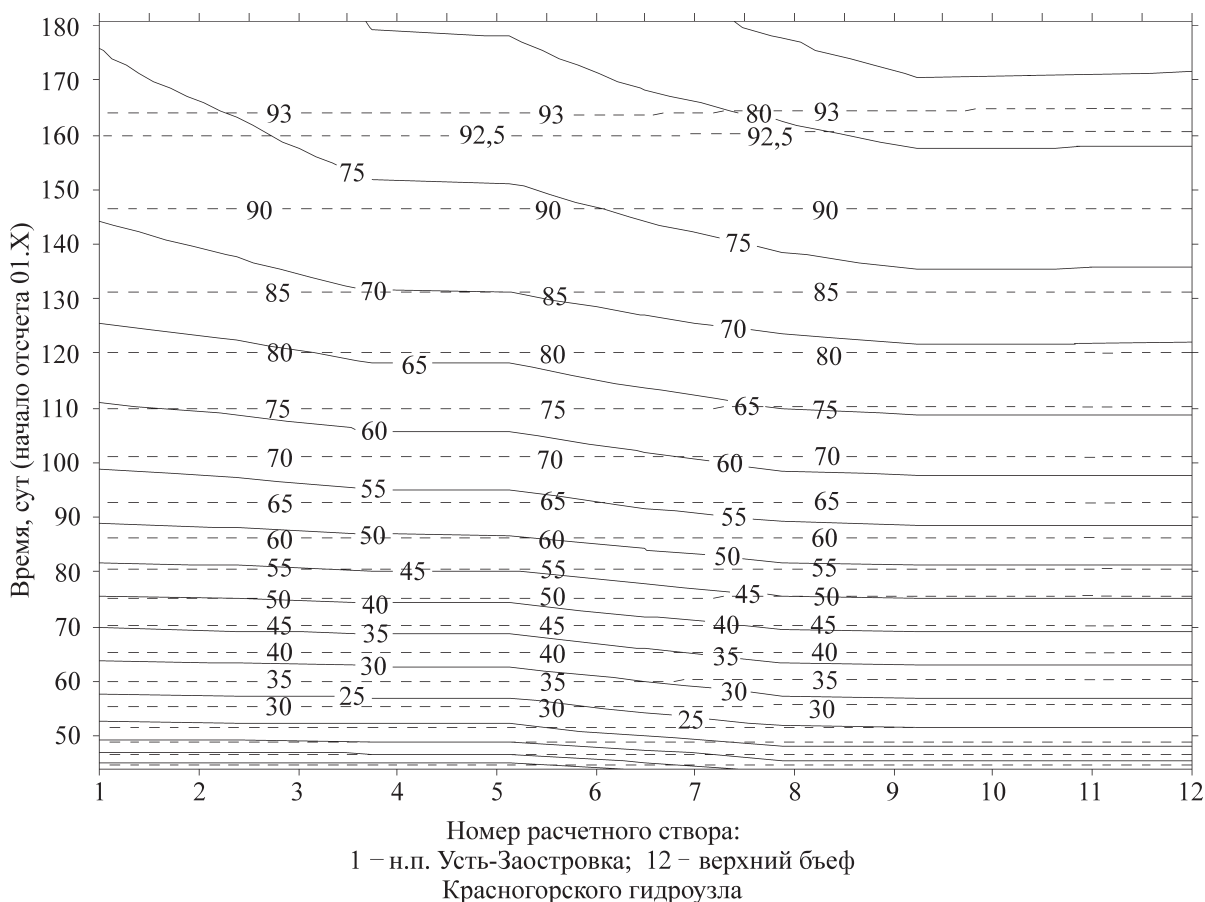


Рис. 3. Изолинии средней многолетней толщины льда в водохранилище (сплошная линия) и толщины льда без учета теплообмена вод со льдом (пунктирная линия), см

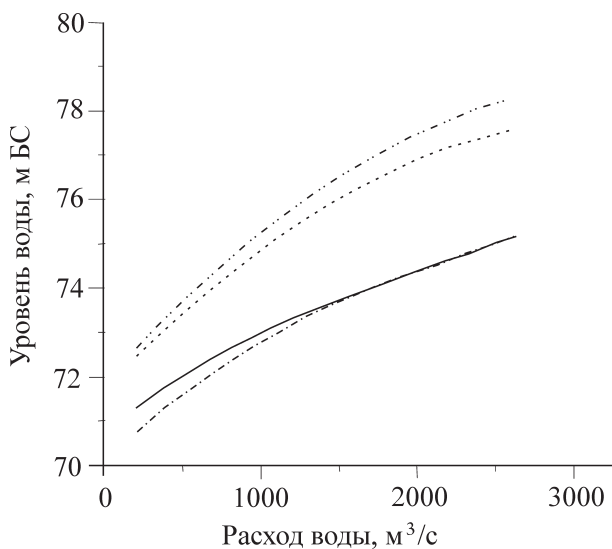


Рис. 4. Затонные уровни в зоне выклинивания подпора: — · · · поверхность, свободная ото льда (река); — поверхность, свободная ото льда (водохранилище); · · · · · весенний ледоход ($L = 80$ В; $k_{л} = 0,7$; $k_{н} = 0,8$, водохранилище); - · · - весенний ледоход ($L = 100$ В; $k_{л} = 0,8$; $k_{н} = 0,75$, водохранилище)

ледоходе проходят в естественном (бытовом) режиме без создания подпора гидроузлом. В условиях подпора при расходе $310 \text{ м}^3/\text{с}$ наивысший затонный уровень составит $72,79 \text{ м БС}$, а при расходе $1430 \text{ м}^3/\text{с}$ – $76,03 \text{ м БС}$.

В табл. 2 представлена длина полыньи (в метрах) различной обеспеченности по месяцам. При расчете длины

полыньи в нижнем бьефе различной обеспеченности предполагалось, что гидрологические характеристики имеют 100%-ю корреляцию с метеорологическими характеристиками.

Выводы

При создании Красногорского гидроузла на реке Иртыш рассматриваемый участок водохранилища будет

Таблица 2

Месяц	Обеспеченность, %		
	0,5	1	3
Ноябрь	1360	720	170
Декабрь	83	78	0
Январь	0	0	0
Февраль	0	0	0
Март	1520	230	140

лучше прогреваться во второй декаде апреля (по сравнению с рекой). Такая тенденция сохранится до мая. С мая по июнь температуры воды реки и водохранилища отличаться не будут. Это связано с прохождением весеннего половодья в мае – июне, когда характеристики водохранилища (глубина и ширина) практически не отличаются от характеристик реки. С уменьшением расхода воды в июле вода в водохранилище начнет прогреваться лучше, чем в реке. Такая тенденция сохранится до октября.

В октябре температуры воды в водохранилище и в реке практически не отличаются, но ближе к плотине температура воды в водохранилище немного ниже, чем в реке. Начиная с ноября вода в водохранилище становится холоднее, чем в реке. Максимальное отличие температур наблюдается на приплотинном участке и составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя годовая температура в водохранилище по сравнению с температурой реки возрастает на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет $10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчеты показали, что переменный по длине реки коэффициент теплоотдачи от водной поверхности в атмосферу практически не оказывает влияния на температуру воды. Следовательно, при расчете участка длиной 66 км коэффициент теплоотдачи от водной поверхности в атмосферу можно считать постоянным.

В период ледообразования скорость продвижения кромки льда в водохранилище в несколько раз превышает скорость продвижения кромки льда в реке.

Толщина льда в водохранилище больше, чем толщина льда в реке. Основными факторами, которые влияют

на толщину льда, являются высота снежного покрова и температура воздуха. Второстепенный фактор – скорость потока воды. Толщина льда на приплотинном участке больше, чем на некотором удалении от гидроузла. Ледостав на приплотинном участке начинается раньше, и с удалением от гидроузла начинает проявляться в большей степени бытовой режим реки. В течение зимы скорость нарастания толщины льда уменьшается, потому что нарастает высота снежного покрова, уменьшается температура воздуха, снижается взаимодействие льда с атмосферой. Ближе к концу зимы за счет увеличения температуры воздуха происходит уменьшение теплоотдачи со стороны льда в атмосферу. При расчете толщины льда по уравнению (5) следует учитывать теплообмен воды со льдом, который образуется за счет интенсивности теплового потока со дна русла и перехода механической энергии в тепловую. Если не учитывать теплообмен воды со льдом, то можно получить только приближенные и неточные результаты.

После строительства гидроузла в период весеннего ледохода в зоне выклинивания подпора водохранилища происходит стеснение живого сечения русла за счет поступления льда с большей скоростью с верховий реки и меньшей скоростью отхода льда от этой зоны, что приводит к повышению уровней воды. Однако гидроузел создает подпор в реке при пропуске расходов до $1430\text{ м}^3/\text{с}$. При этом уровень воды поднимется до отметки $76,03\text{ м БС}$, что не превысит отметки поймы $76,47\text{ м БС}$.

При расходе $310 \text{ м}^3/\text{с}$ уровень заторного участка в условиях водохранилища по сравнению с естественными условиями увеличится не более чем на 10 см. Таким образом, гидротехническое сооружение не оказывает влияния на процесс затопления поймы в зоне выклинивания подпора.

В зимний период за счет стеснения живого сечения затворами гидроузла происходит увеличение скоростей потока на водосбросных плотинах. Увеличение скоростей потока приводит к интенсивному образованию внутренней теплоты за счет преобразования механической энергии воды в тепловую. Появившаяся внутренняя теплота увеличивает тепловой поток к нижней поверхности льда. Если тепловой поток со стороны водной поверхности оказывается больше теплового потока в окружающую среду, то это приводит к образованию полыньи в нижнем бьефе гидроузла.

Полынья максимальной длины образуется в марте и в ноябре. В зависимости от рассматриваемых вариантов обеспеченности максимальная длина полыньи изменяется от 140 м при 3 % до 1520 м при 0,5 %.

1. **А. И. Пехович.** Основы гидроледотермики. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.

2. Рекомендации по расчету длины полыньи в нижних бьефах ГЭС. П 28-86. – Л.: ВНИИГ, 1986. – 40 с.

3. Мосты и трубы: пособие к СНиП 2.05.03-84 по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). – 347 с.

Материал поступил в редакцию 07.04.10.

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ректор

Тел. 8 (495) 976-29-62

E-mail: kozlovdv@mail.ru

Савельев Константин Леонидович, инженер I категории

Тел. 8-916-298-76-66

E-mail: savelevkl@mail.ru