МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС

П 28-86
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1 9 8 6

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС

П 28—86
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1986

УДК 551.482.215.71

«Рекомендации по расчету длины полыньи в нижних бьефах ГЭС» содержат изложение методики расчета длины полыньи при отсутствии и наличии тепловых стоков в нижнем бьефе. Приводятся также список необходимых исходных данных, примеры расчета.

Настоящие Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников, выполняющих расчеты в области ледотермики речных потоков и нижних бьефов.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1986.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Освоение районов Сибири и Крайнего Севера, строительство мощных высоконапорных гидроузлов приводит зимой к сбросу теплой воды в нижний бьеф и образованию полыньи, которая распространяется на большое расстояние вниз по течению, существенным образом влияя на ледотермический режим реки, а следовательно, на климат и экологию района зарегулирования. В этих условиях большое значение приобретает прогноз длины полыньи и динамики движения кромки ледяного покрова в нижних бьефах ГЭС.

Настоящие Рекомендации посвящены вопросу расчета длины полыньи в нижних бьефах ГЭС в режимах наступления, отступления и стабилизации кромки льда; в Рекомендациях приводится также методика расчета длины полыньи с учетом влияния тепловых сбросов, расположенных в нижнем бьефе.

Рекомендации разработаны на основе проанализированного и переработанного материала, опубликованного в отечественной и зарубежной литературе, а также результатов расчетно-теоретических исследований, проведенных во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

Рекомендации составлены сотрудниками ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: мл. науч. сотр., канд. техн. наук Е. Л. Разговоровой и мл. науч. сотр. Г. А. Трегуб. Научный руководитель работы — доктор техн. наук Л. И. Кудояров.

В работе над Рекомендациями учтены ценные замечания, высказанные Я. Л. Готлибом, Г. Н. Нисар-Мухамедовой (Гидропроект им. С. Я. Жука), С. Н. Назаренко (Ленгидропроект), Р. В. Донченко (ГГИ), А. Ж. Жулаевым (КазНИИВХ), М. М. Бейлинсоном (КазПИ им. Абая), В. В. Балаиным, Б. С. Бородкиным, М. И. Жидких (ЛИВТ), А. И. Бефани, Л. Е. Кресс (ОГМИ), И. И. Макаровым, В. А. Кякком, И. Н. Соколовым, И. Н. Шаталиной, А. Б. Векслером (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Рекомендации предназначены для расчета длины полыньи в нижних бьефах проектируемых, строящихся и эксплуатируемых гидроузлов энергетического и транспортного назначения. Рекомендации содержат методику расчета длины полыньи в нижнем бьефе в режимах наступления, стабилизации и отступления кромки льда без учета и с учетом действия тепловых стоков (сбросов), расположенных в нижнем бьефе, перечень исходных данных и примеры расчета.

1.2. Рекомендации должны использоваться на всех стадиях проектирования и эксплуатации гидроузлов.

1.3. Рекомендации предназначены для расчета термической полыньи. Область их применения не распространяется на расчет полыньи, возникающей при взламывании и подвижке ледяного покрова за счет резкого изменения расходов воды в нижнем бьефе.

1.4. В Рекомендациях приняты международная система единиц СИ и следующие обозначения:

$a_л$, $a_с$ — температуропроводность льда и снега, соответственно, м^2/с;

b — ширина нижнего бьефа по урезу воды, м;

$b_з$ — ширина заберегов, м;

c, $c_л$ — удельная теплоемкость воды и льда, соответственно, Дж/(кг·К);

C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с;

$h_л$, $h_с$ — толщина льда и снега, соответственно, м;

$h_н$ — толщина льда на кромке (начальная толщина льда), м;

H — глубина нижнего бьефа, м;

$q_{ст}$ — мощность тепловых стоков, Вт;

Q, $Q_ш$ — расходы воды и шуги, м^3/с;

Внесены ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева	Утверждены ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева решением № 27 от 12.05.1986 г. и согласованы с Главтехуправлением	Срок введения I кв. 1987 г.

R — гидравлический радиус;

S — интенсивность теплового потока, Вт/м²;

V — скорость течения, м/с;

x — координата по длине потока, м;

x_0, $x_н$ — координаты створа нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования, соответственно, м;

$x_{к.0}$ — длина полыньи в начале расчетного периода, м;

$x_к$ — длина полыньи в конце расчетного периода, м;

z — координата по глубине потока; м;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от воды к воздуху, Вт/(м²·К);

α_2 — коэффициент теплоотдачи от воды к нижней поверхности льда, Вт/(м²·К);

α_3 — коэффициент теплоотдачи от льда (снега) к воздуху, Вт/(м²·К);

t_0 — температура воды, поступающей из верхнего бьефа в нижний, °С;

$\beta_ш$ — степень покрытия шугой водной поверхности;

ϑ — температура воздуха, °С;

$\vartheta_э$, $\vartheta_{э.л}$ — эквивалентная температура воздуха над поверхностью воды и льда, соответственно, °С;

$\lambda_л$, $\lambda_с$ — теплопроводность льда и снега, Вт/(м·К);

λ — коэффициент гидравлического трения;

$n_ш$, $n_р$ — коэффициенты шероховатости нижней поверхности шуги и русла, с/м^{0,33};

ρ, $\rho_л$, $\rho_ш$ — плотность воды, льда, шуги, соответственно, кг/м³;

σ — удельная скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;

τ — время, с.

Безразмерные критерии и параметры:

Bi — критерий Био, $\mathrm{Bi} \equiv \frac{\alpha_1 h_л}{\lambda_л}$;

Mi — критерий Михеева, $\mathrm{Mi} \equiv \alpha_2 bx/(c\rho Q)$;

$\overline{Q}_ш$ — параметр расхода шуги, $\overline{Q}_ш = Q_ш/(bh_н V)$;

X — параметр координаты, $X = \frac{\alpha_1(-\vartheta_э)(x-x_0)}{2h_н\sigma_л\rho_ш V}$;

$\overline{\tau}$ — параметр времени, $\overline{\tau} \equiv \frac{\alpha_1(-\vartheta_э)\tau}{2h_н\sigma_л\rho_ш}$;

Ш — параметр, характеризующий интенсивность действия тепловых стоков, $Ш = \frac{\sigma_л\rho_ш Q_ш}{q_{ст}}$.

2. ПЕРЕЧЕНЬ НЕОБХОДИМЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

2.1. Исходными данными для выполнения расчета длины полыньи являются морфологические и гидрологические параметры нижнего бьефа, метеорология района.

2.2. Морфологические параметры включают в себя:

а) график изменения фактической и средневзвешенной ширины русла по урезу воды по длине предполагаемого расчетного участка нижнего бьефа при минимальном, максимальном и среднем расходах соответствующей обеспеченности; применительно к действующим ГЭС указанные параметры должны выбираться при расходе воды, для которого производится этот расчет;

б) поперечные разрезы русла по длине нижнего бьефа при тех же расходах.

2.3. Гидрологические параметры включают в себя:

а) расход воды: для строящихся и эксплуатируемых ГЭС при проведении поверочных расчетов расход воды в нижнем бьефе выбирается средним по пятидневкам (декадам), на которые разбивается расчетный период; для расчета длины полыньи в нижних бьефах проектируемых ГЭС выбираются расходы воды в реке для средневодного, маловодного и многоводного годов соответствующей обеспеченности по пятидневкам (декадам);

б) толщины льда и снега в нижнем бьефе по пятидневкам (декадам);

в) средние и средневзвешенные скорости течения по длине предполагаемого расчетного участка для заданных расходов воды;

г) даты ледостава и вскрытия;

д) предледоставный расход и плотность шуги; если пористость шуги неизвестна, то ее следует выбирать на основании приложения 1.

е) ширина заберегов по пятидневкам (декадам) за расчетный период; если неизвестна ширина заберегов, то ее рекомендуется рассчитывать по формуле [13]:

$$b_з = b(1 - m), \qquad (1)$$

где $m = 0{,}42V^{0{,}2} + K$; коэффициент K для русел с мелководными зонами и пологими берегами равен 0,525, при отсутствии мелководных зон и крутых берегах $K = 0{,}465$.

2.4. Метеорологические данные должны относиться к району расположения полыньи, охватывать расчетный период и содержать следующие сведения:температуру воздуха ϑ, скорость ветра W, облачность общую и нижнюю $n_о$, $n_н$, абсолютную влажность воздуха e. Возможно осреднение метеорологических данных по пятидневкам или декадам.

2.5. При расчете составляющих теплообмена воды и воздуха при отсутствии массовых систематических наблюдений за метеорологическими условиями над водной поверхностью могут быть использованы данные береговых наблюдательных станций, либо данные наблюдений более или менее отдаленных от

водного объекта континентальных станций с введением необходимых поправок [8].

а) Средняя скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью определяется по формуле

$$W = K_1 K_2 K_3 W_ф, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий степень защищенности метеорологической станции на суше (табл. 1); K_2 — коэффициент, учитывающий характер рельефа в пункте наблюдений

Таблица 1

Местоположение и степень защищенности метеостанции на суше	K_1
Лесная зона СССР	
Станция в лесу или в большом городе	
флюгер на уровне деревьев или строений	2,4
флюгер выше окружающих препятствий	2,2
На окраине города или большого селения; отдельные деревья или строения выше флюгера	2,0
В селении, в саду или на окраине города; строения и деревья ниже флюгера	1,8
На открытой ровной площадке; деревья, дома, возвышенности на расстоянии 20—30-кратной высоты флюгера	1,5
Поле, луг. аэродром; с одной стороны в 200—500 м лес или строения города, большого селения	1,3
Безлесные районы СССР	
В городе или большом селении	
флюгер на уровне деревьев или жилых домов	1,5
флюгер выше окружающих препятствий	1,3
В степи или на окраине небольшого селения; отдельные дома и строения с одной стороны в 100—200 м, флюгер доминирует над местностью	1,0
Берег облесен или застроен домами, многие из которых выше флюгера	1,3
Берег открытый, станция в 200—300 м от уреза, в 100—200 м лес и строения	1,1
На открытом берегу	0,9
На оконечности далеко выдающегося в водоем открытого мыса	0,8

(табл. 2); K_3 — коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водной поверхностью при различной защищенности станции (табл. 3); $W_ф$ — скорость ветра на высоте расположения флюгера, м/с.

б) Средняя влажность воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью должна рассчитываться по формуле

$$e = e' + (0{,}8e_0 - e')M_1, \text{ мб}, \quad (3)$$

где e' — средняя влажность воздуха, измеренная на континентальной метеостанции, мб; e_0 — максимальная упругость водя-

Таблица 2

Характеристика рельефа в районе метеостанции	K_2
Вершина крутого холма	0,75
Вершина пологого холма и верхняя часть склона	0,9
Равнина, весьма широкая долина	1,0
Нижняя часть склона, дно нешироких и неглубоких долин, котловин, лощин	1,1
Дно глубоких долин, котловин, лощин	1,3

Таблица 3

Растительность на берегах реки, водоема	Средняя высота растительности, м	Значение K_3							
		Средняя протяженность водной поверхности, км							
		0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	>5,0
Трава	0,1	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Кустарник	5,0	0,40	0,55	0,70	0,85	0,95	1,00	1,00	1,00
Лес	20	0,15	0,25	0,40	0,60	0,75	0,90	0,95	1,00

Таблица 4

Температура воды, °С	Максимальная упругость водяного пара e_0, мб
0,0	6,1
0,2	6,2
0,4	6,3
0,6	6,4
0,8	6,5
1,0	6,6
1,5	6,8
2,0	7,0
2,5	7,3
3,0	7,6
3,5	7,8
4,0	8,1

лыньи, $t_п \approx 0{,}5t_0$, °С.

ного пара, определенная по температуре поверхности воды (табл. 4), мб; M_1 — коэффициент трансформации, учитывающий изменение влажности и температуры воздуха над водной поверхностью, находится по табл. 5 в зависимости от среднего расстояния от подветренного берега и разности температур воды и воздуха.

в) Средняя температура воздуха над водной поверхностью на высоте 2 м должна рассчитываться по формуле

$$\vartheta = \vartheta' + (t_п - \vartheta')M_1, \qquad (4)$$

где ϑ' — температура воздуха по данным метеорологической станции, расположенной на суше, °С; $t_п$ — температура поверхности воды для расчета длины по-

Таблица 5

Соотношение температур воды и воздуха, °С	Коэффициент трансформации M_1								
	Расстояние от подветренного берега, км								
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10	20	50
$4 \leqslant t_п - \vartheta' \leqslant 10$	0,02	0,08	0,08	0,12	0,16	0,23	0,28	0,34	0,44
$t_п - \vartheta' < 4$	0,03	0,06	0,13	0,18	0,24	0,33	0,38	0,43	0,53
$t_п - \vartheta' > 10$	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,15	0,19	0,28

г) Для участков рек шириной не более 500 м значения ϑ, e, W следует принимать без введения поправок.

2.6. При проведении расчета должны быть известны:

а) температура воды в начале нижнего бьефа t_0 или температура воды в створе нижнего бьефа, ближайшем к ГЭС;

б) при наличии тепловых сбросов в нижнем бьефе — их мощность или расходы и температуры воды тепловых сбросов.

2.7. Если по рассматриваемому объекту необходимые исходные данные отсутствуют, то их подбор должен производиться по методу аналогов.

2.8. Необходимые для расчета длины полыньи физические постоянные даны в приложении 1.

3. РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ ВОДЫ И ЛЬДА С ВОЗДУХОМ

3.1. Исходными данными для расчета длины полыньи являются величины коэффициента теплоотдачи от воды к воздуху и от льда (снега) к воздуху (α_1 и α_3), а также эквивалентная температура воздуха над поверхностью воды $\vartheta_э$ и льда (снега) $\vartheta_{э.л}$.

3.2. Расчет коэффициента теплоотдачи от воды к воздуху и эквивалентной температуры воздуха над поверхностью воды следует проводить на основании п. 2 «Рекомендаций по термическому расчету водохранилищ» [7].

а) Эквивалентная температура воздуха и коэффициент теплоотдачи от воды к воздуху рассчитываются по формулам:

$$\vartheta_э = \vartheta + \frac{S_R + S_и}{\alpha_1}, \tag{5}$$

$$\alpha_1 = 2{,}65[1 + 0{,}8W + f(t_п - \vartheta)], \tag{6}$$

где S_R — интенсивность радиационного теплообмена, Вт/м²; $S_и$ — интенсивность теплообмена при испарении, Вт/м²; $f(t_п - \vartheta)$ — функция, учитывающая увеличение интенсивности испарения за счет разности температур воды и воздуха, определяется по табл. 6.

Таблица 6

$t_п - \vartheta$, °С	$f(t_п - \vartheta)$	$t_п - \vartheta$, °С	$f(t_п - \vartheta)$
0	0	0	0
1	0,15	—1	—0,16
2	0,30	—2	—0,30
3	0,43	—3	—0,42
5	0,66	—4	—0,51
7	0,85	—5	—0,59
10	1,09	—6	—0,66
12	1,21	—7	—0,72
14	1,32	—8	—0,76
16	1,41	—9	—0,80
20	1,55	—10	—0,83

б) Интенсивность радиационного теплообмена должна определяться зависимостью

$$S_R = (Q+q)_0 k_e k_z \left[1 - k_н \cdot n_н - k_{в+с} \cdot (n_о - n_н) \frac{1-A}{1-\gamma A} \cdot \sigma_с T^4 (b' + b'')\right]. \quad (7)$$

При отсутствии данных о распределении облачности по ярусам для расчета следует использовать формулу

$$S_R = (Q+q)_0 [1 - (1-k)n](1-A) - I(1 - c_1 n^2) - 3{,}6\,\sigma_с T_в^3 (T_п - T_в). \quad (8)$$

Здесь $(Q+q)_0$ — суммарная солнечная радиация на уровне моря при альбедо, равном нулю, Вт/м², находится по табл. 2-1 приложения 2; k_e — коэффициент, учитывающий отклонение влажности воздуха от ее среднесуточного значения, определяется по формуле $k_e = 1 + n(e_{пр} - e)$, где e — влажность воздуха, наблюдаемая на высоте 2 м над подстилающей поверхностью, мб; величины n и $e_{пр}$ даны в табл. 2-2 приложения 2; k_z — коэффициент, учитывающий влияние высоты местности над уровнем моря, определяется по табл. 2-3 приложения 2; $n_о$, $n_н$ — облачность общая и нижняя, доли единицы; $k_н$ и $k_{в+с}$ — коэффициенты, учитывающие задержание суммарной радиации облаками нижнего и совместно верхнего и среднего ярусов, определяются по табл. 2-4, 2-5 приложения 2; A — среднесуточное альбедо поверхности воды, определяется по табл. 2-6 приложения 2; γ — доля рассеянной по направлению к поверхности воды радиации, которую следует определять по формуле

$$\gamma = 0{,}3 + 0{,}5 n_н + 0{,}42 (n_о - n_н);$$

b', b'' — величины, зависящие от влажности воздуха и облачности, определяются по табл. 2-7, 2-8 приложения 2; $\sigma_с$ — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5{,}777 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴); $T_в$ — абсолютная температура воздуха на высоте 2 м, равная $T_в = (273{,}16 + \vartheta)$, К; ϑ — температура воздуха на высоте 2 м, °С; значения $\sigma_с T^4$ определяются по табл. 2-9 приложения 2; k — коэффициент, определяемый по табл. 2-10 приложения 2; n — наблюденная облачность, доли единицы; c_1 — коэффициент, определяемый по табл. 2-11 приложения 2; I — эффективное излучение при безоблачном небе, Вт/м², определяется по табл. 2-12 приложения 2; $T_п$ — абсолютная температура поверхности воды $T_п = (273{,}16 + t_п)$, К.

в) Интенсивность теплообмена при испарении следует рассчитывать по формуле

$$S_и = 4{,}1 (e - e_0)[1 + 0{,}8W + f(t_п - \vartheta)], \text{ Вт/м}^2. \quad (9)$$

3.3. Расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности льда (снега) к воздуху рекомендуется производить по формуле [11]

$$\alpha_з = BW, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \qquad (10)$$

где W — скорость ветра, м/с; коэффициент B определяется по табл. 7.

Таблица 7

ϑ, °С	— 40	— 30	— 20	— 10	0	10
B, Дж/(м³·К)	7,12	6,88	6,67	6,48	6,27	6,07

3.4. Эквивалентную температуру воздуха над ледяным покровом следует рассчитывать по формуле

$$\vartheta_{э.л} = \vartheta + \frac{S_{R.л} + S_{и.л}}{\alpha_з}, \qquad (11)$$

где $S_{R.л}$, $S_{и.л}$ — соответственно, интенсивность радиационного теплообмена и теплообмена при испарении с поверхности льда.

Интенсивность радиационного теплообмена следует рассчитывать, используя зависимости (7) и (8), но вместо альбедо поверхности воды подставлять альбедо льда или снега (табл. 8).

Таблица 8

Вид льда, снега	Альбедо A
Чистый лед	0,12
Малопрозрачный лед с пузырьками воздуха	0,2—0,3
Талый лед	0,3—0,4
Свежевыпавший снег	0,85—0,95
Чистый влажный снег	0,6—0,7
Загрязненный снег	0,4—0,5
Весенний тающий снег	0,3—0,4

Температура поверхности льда должна определяться по формуле

$$t_п = -\frac{\vartheta h_{л.0}/\lambda_л}{1/\alpha_з + h_{л.0}/\lambda_л}; \qquad (12)$$

при наличии снежного покрова температура поверхности снега:

$$t_п = \vartheta\left(-\frac{h_{л.0}/\lambda_л + h_с/\lambda_с}{1/\alpha_з + h_{л.0}/\lambda_л + h_с/\lambda_с}\right), \qquad (13)$$

где $h_{л.0}$ — толщина льда в начале расчетного периода; $h_с$ — толщина слоя снега.

Интенсивность теплового потока при испарении с поверхности льда следует находить, используя зависимость [20]

$$S_{и.л} = 6{,}24\cdot 10^{-3}(K_4 + W)(e - e_0), \text{ Вт/м}^2, \qquad (14)$$

где K_4 определяется в зависимости от разности температур поверхности льда и воздуха (табл. 9).

Таблица 9

$t_п - \vartheta$, °С	0	1	2	3	4	5
K_4, м/с	1,28	1,62	1,92	2,10	2,25	2,46
$t_п - \vartheta$, °С	6	8	10	15	20	
K_4, м/с	2,60	2,86	3,10	3,60	4,00	

4. РАСЧЕТ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ

Расчетные режимы

4.1. При расчете длины полыньи имеют место три режима движения кромки ледяного покрова: наступление, отступление и стабилизация.

Таблица 10

Режим	Условия существования	Температура воды на кромке, °С
Наступление	$x_0 < x_{к.о}$	$t_{кр} \leqslant 0$
Отступление	$x_0 > x_{к.о}$	$t_{кр} > 0$
Стабилизация	$x_0 = x_{к.о}$	$t_{кр} = 0$

4.2. Условия существования того или иного режима движения кромки льда представлены в табл. 10.

4.3. Расчет положения створа нулевой изотермы должен проводиться по формуле

$$x_0 = \frac{c\rho Q}{\alpha_1 b} \cdot \ln\left(1 - \frac{t_0}{\vartheta_э}\right). \qquad (15)$$

4.4. Если имеют место забереги по длине нижнего бьефа, то вместо ширины русла b в формулу (15) подставляется величина b_1:

$$b_1 = b - b_з. \qquad (16)$$

4.5. Длина полыньи в режиме стабилизации кромки совпадает с положением нулевой изотермы, и ее следует рассчитывать по формуле (15).

4.6. Длина участка между створом нулевой изотермы и створом начала внутриводного ледообразования рассчитывается в соответствии с приложением 3 [16].

Расчет длины полыньи при наступлении кромки ледяного покрова

4.7. Толщина льда на кромке при ее наступлении определяется из условий предельно-напряженного состояния шугового ковра и должна рассчитываться по формуле [4, 6, 21]

$$h_н = 1{,}77 \frac{V^2 b_1}{C^2}. \qquad (17)$$

а) Коэффициент Шези следует определять по формуле

$$C = R^{1/6}/n_{пр}, \qquad (18)$$

где R — гидравлический радиус, м; $R = F_0/P_0$; F_0 — площадь поперечного сечения русла при заданном расходе, м^2; P_0 — смоченный периметр, м.

Если русло прямоугольное, то

$$R = \frac{bH}{2H + b}, \tag{19}$$

где

$$H = Q/(bV).$$

б) При расчете приведенного коэффициента шероховатости русла следует пользоваться зависимостью:

$$n_{пр} = \frac{\left(n_р^{1,5} + n_ш^{1,5}\right)^{2/3}}{2}, \text{ с/м}^{0,33}, \tag{20}$$

где $n_р$, $n_ш$ — коэффициенты шероховатости русла при открытой водной поверхности и нижней поверхности шуги, соответственно.

в) Определение коэффициентов шероховатости русла и нижней поверхности шуги необходимо проводить по следующим формулам [8]:

$$n_р = \frac{F_0 R^{2/3} (\Delta z/L)^{1/2}}{Q}, \text{ с/м}^{0,33}, \tag{21}$$

$$n_ш = \sqrt{\frac{\lambda R^{1/3}}{8g}}, \text{ с/м}^{0,33}, \tag{22}$$

где Δz — падение свободной поверхности потока на участке длиной L при открытой водной поверхности, м; λ — коэффициент гидравлического трения:

$$\lambda = 0{,}042\left(\frac{\Delta_л}{R}\right)^{0,4}, \tag{23}$$

$\Delta_л$ — высота выступов нижней поверхности шуги (льда), м:

$$\Delta_л = h_{н.0} \cos 45°, \tag{24}$$

$h_{н.0}$ — начальная толщина льдин, из которых формируется кромка; при $V = 0{,}15 \div 0{,}2$ м/с $h_{н.0} = 0{,}025$ м; при $V = 0{,}2 \div 0{,}8$ м/с $h_{н.0} = 0{,}05$ м; при $V = 0{,}8 \div 1$ м/с $h_{н.0} = 0{,}2$ м [13].

г) Для нижних бьефов действующих ГЭС, когда имеются натурные наблюдения над толщиной льда, величину $h_н$ следует рассчитывать по формуле

$$h_н = -\frac{\lambda_л}{\alpha_з} + \sqrt{\left(h_{л.0} + \frac{\lambda_л}{\alpha_з}\right)^2 + \frac{2\lambda_л \vartheta_{э.л} \tau_л}{\sigma_л \rho_л}}, \tag{25}$$

где $h_{л.0}$ — измеренная в натуре толщина льда у кромки на дату, ближайшую к дате ледостава; $\tau_л$ — продолжительность периода времени от даты ледостава до даты измерения толщины льда

$h_{л.0}$; α_3 — коэффициент теплоотдачи от льда к воздуху, средний за время $\tau_л$; $\vartheta_{э.л}$ — эквивалентная температура воздуха надо льдом, средняя за время $\tau_л$.

4.8. Для действующих ГЭС начальное положение кромки льда определяется по данным натурных наблюдений.

4.9. Для проектируемых ГЭС или в случае отсутствия данных о начальном положении кромки при проведении поверочных расчетов для действующих ГЭС начальное положение кромки льда рассчитывается по формуле

$$x_{к.н} = \frac{2h_н\sigma_л\rho_ш V}{\alpha_1(-\vartheta_э)} \cdot X_н + x_0, \qquad (26)$$

где $X_н$ — безразмерный параметр, определяющий соотношение между интенсивностью теплообмена воды с атмосферой и объемной скрытой теплотой кристаллизации, которая выделяется при образовании шуги, формирующей кромку, при толщине льда на кромке $h_н$, в единицу времени; параметр $X_н$ находится по графику на рис. 1 в соответствии с п. 4.10 настоящих Рекомендаций.

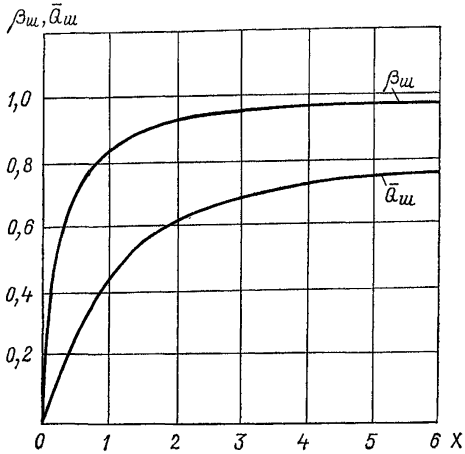


Рис. 1. Графики зависимостей $\beta_ш(X)$ и $\overline{Q}_ш(X)$.

4.10. Параметр $X_н$ определяют либо по известному предледоставному расходу шуги $Q_{ш.0}$, либо по ширине заберегов в предледоставный период $b_{з.0}$, измеренной у створа, ближайшего к кромке льда.

а) Если задан предледоставный расход шуги $Q_{ш.0}$, то следует рассчитать параметр $\overline{Q}_{ш.0}$:

$$\overline{Q}_{ш.0} = \frac{Q_{ш.0}}{b_1 h_н V}, \qquad (27)$$

и по известному значению параметра $\bar{Q}_{ш.0}$ и по графику $\bar{Q}_{ш}(X)$ (рис. 1) найти $X_н$.

б) Если задана ширина заберегов $b_{э.0}$, то следует определить степень покрытия шугой водной поверхности вблизи кромки льда в предледоставный период:

$$\beta_{ш.0} = 1 - b_{э.0}/b \qquad (28)$$

и по известному значению $\beta_{ш.0}$ и графику $\beta_{ш}(X)$ на рис. 1 найти параметр $X_н$.

4.11. Длину полыньи в конце каждого расчетного периода следует вычислять по формуле

$$x_к = \frac{X_к}{X_{к.0}}(x_{к.0} - x_0) + x_0, \qquad (29)$$

где $x_{к.0}$ — положение кромки льда в начале расчетного периода.

4.12. Параметр $X_к$ должен находиться по графику $\bar{\tau}(X_к)$ (рис. 2) при значении параметра $\bar{\tau}$:

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_н - \frac{a_1 \cdot \vartheta_э \cdot \tau_j}{2h_н \cdot \sigma \cdot \rho_ш}, \qquad (30)$$

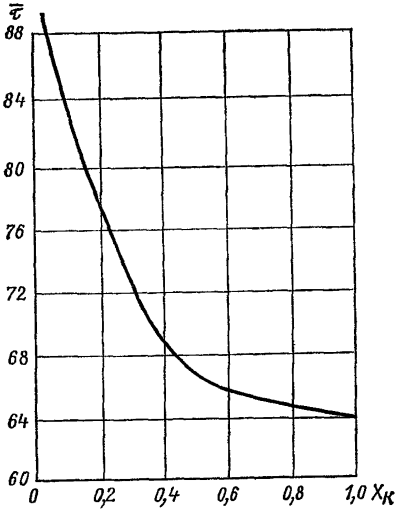


Рис. 2. График зависимости $\bar{\tau}(X_к)$.

где $\bar{\tau}_н$ определяется по графику $\bar{\tau}(X_к)$ (рис. 2) при $X_к = X_{к.0}$. Параметр $\bar{\tau}$ характеризует отношение количества тепла, отданное водой в атмосферу за расчетный период τ_j, к объемной

скрытой теплоте кристаллизации, выделившейся при образовании слоя шуги толщиной $h_н$.

4.13. Параметр $X_{к.0}$ следует вычислять по формуле

$$X_{к.0} = \frac{\alpha_1 (-\vartheta_э)(x_{к.0} - x_0)}{2h_н a \rho_ш V}. \quad (31)$$

Расчет длины полыньи при отступлении кромки ледяного покрова

4.14. При отступлении кромки ледяного покрова длина полыньи должна рассчитываться по формуле

$$x_к = x_{к.0} + V_{кр}\tau_j, \quad (32)$$

где $V_{кр}$ — скорость отступления кромки льда.

4.15. Скорость отступления кромки должна определяться на основании анализа теплового баланса на прикромочном участке таяния в зависимости от температур воздуха и воды, подходящей к кромке льда. Выбор расчетных формул для определения $V_{кр}$ проводится в соответствии с табл. 11, исходя из условий теплообмена льда с водой и воздухом:

$$V_{кр} = \frac{q_0 - q_т - q_н}{\sigma_1 \rho_л \overline{h} b}, \quad (33)$$

где σ_1 — удельная скрытая теплота фазового перехода с учетом запаса холода во льду; $\overline{h}$ — приведенная толщина льда на участке таяния протяженностью $x_т$; q_0 — количество тепла, Вт, приносимое к кромке водой в единицу времени; $q_т$ — количество тепла, Вт, уносимое потоком от створа, в котором прекращается таяние льда с нижней поверхности; $q_н$ — количество тепла, Вт, расходуемое на таяние льда с нижней поверхности на участке таяния.

4.16. Количество тепла, приносимое к кромке водой в единицу времени, q_0, должно определяться зависимостью

$$q_0 = c\rho Q t_{кр}, \quad (34)$$

где $t_{кр}$ — температура воды на кромке льда:

$$t_{кр} = (t_0 - \vartheta_э)\, e^{-\frac{\alpha_1 b x_к}{c\rho Q}} + \vartheta_э. \quad (35)$$

Количество тепла, уносимое потоком в единицу времени от створа, в котором прекращается таяние на нижней поверхности льда, $q_т$, следует находить по формуле

$$q_т = c\rho Q t_т. \quad (36)$$

Здесь $t_т$ — температура воды в створе, где прекращается таяние льда с нижней поверхности:

$$t_т = \frac{\alpha_3 (-\vartheta_{э.л})}{\alpha_2 (1 + Bi)}, \quad (37)$$

где $Bi = \alpha_3 \bar{h}_л / \lambda_л$; α_2 — коэффициент теплоотдачи от воды ко льду, рассчитываемый по формуле [11]

$$\alpha_2 = 2640V, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \tag{38}$$

Приведенную толщину льда на участке таяния $\bar{h}$ с учетом влияния слоя снега следует вычислять по формуле

$$\bar{h} = 0{,}5\left(h_{л.н} + h_c \sqrt{a_л / a_c}\right), \text{ м}, \tag{39}$$

$h_{л.н}$, h_c — толщины льда и снега в начале расчетного периода, м.

Количество тепла, расходуемое в единицу времени на таяние льда с нижней поверхности, следует рассчитывать по формуле

$$q_н = b x_т \left(\alpha_2 \bar{t}_в - \frac{\vartheta_{э.л}}{1/\alpha_3 + \bar{h}/\lambda_л}\right), \tag{40}$$

где $\bar{t}_в$ — средняя температура воды на участке таяния:

$$\bar{t}_в = t_{кр} \frac{1 - e^{-Mi_т}}{Mi_т}, \qquad Mi_т = \frac{\alpha_2 b x_т}{c\rho Q}. \tag{41}$$

Длину участка таяния $x_т$ следует находить по формуле

$$x_т = \frac{c\rho Q}{\alpha_2 b} \cdot \ln \frac{t_{кр}}{t_т}. \tag{42}$$

Величина скрытой удельной теплоты ледообразования с учетом запаса холода во льду σ_1 должна определяться зависимостью [9]

$$\sigma_1 = \sigma_л - \frac{c_л \cdot \rho_л \cdot Bi}{2\rho\,(Bi+1)}(-\vartheta). \tag{43}$$

4.17. Для условий пп. 2, 3 в табл. 11 скорость отступления кромки должна определяться формулой

$$V_{кр} = \frac{c \cdot Q \cdot t_{кр}}{\sigma_л b h_л}. \tag{44}$$

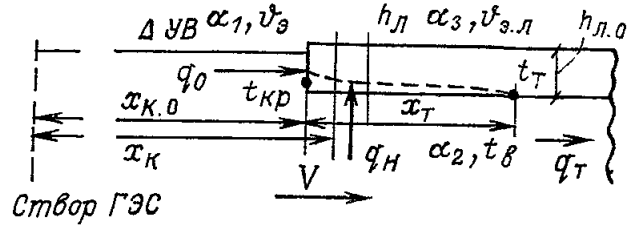
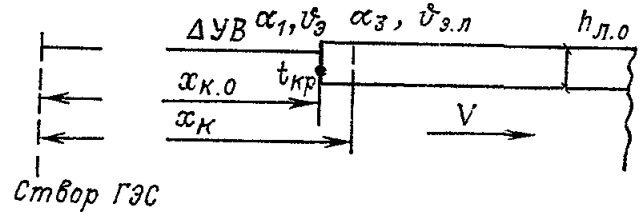
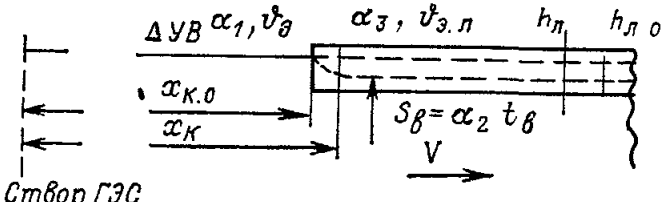
4.18. Для условий п. 4 в табл. 11 скорость отступления кромки следует рассчитывать, пользуясь формулами:

$$V_{кр} = \frac{c \cdot Q \cdot t_{кр}}{\sigma \cdot b \cdot h_л}, \tag{45}$$

где

$$h_л = h_{л.н} - \frac{2640 \cdot V \cdot t_{кр} + \alpha_1 \vartheta_э}{2\sigma_л \rho_л} \cdot \tau_j. \tag{46}$$

Таблица 11

№ пп.	Условия теплообмена воды и льда с воздухом	Тепловая схема	Температура воды на кромке	Расчет длины полыньи по настоящим Рекомендациям	Тепловые процессы
1	$\vartheta_э < 0\,°C$ $\vartheta_{э.л} < 0\,°C$ $\vartheta < 0\,°C$		$t_{кр} \geqslant t_т$	п. 4.16	Таяние льда с фронтальной и нижней поверхностей
2	$\vartheta_э < 0\,°C$ $\vartheta_{э.л} < 0\,°C$ $\vartheta < 0\,°C$		$t_{кр} < t_т$	п. 4.17	Таяние льда с фронтальной поверхности
3	$\vartheta_э > 0$, $\vartheta_{э.л} \leqslant 0$, $\vartheta \leqslant 0$	То же	$t_{кр} > 0$	п. 4.17	То же
4	$\vartheta_э > 0$, $\vartheta_{э.л} > 0$, $\vartheta > 0$		$t_{кр} > 0$	п. 4.18	Таяние льда с верхней, нижней и фронтальной поверхностей льда

4.19. Расчет длины полыньи в нижнем бьефе должен проводиться в той последовательности, которая соответствует блок-схеме, представленной на рис. 3.

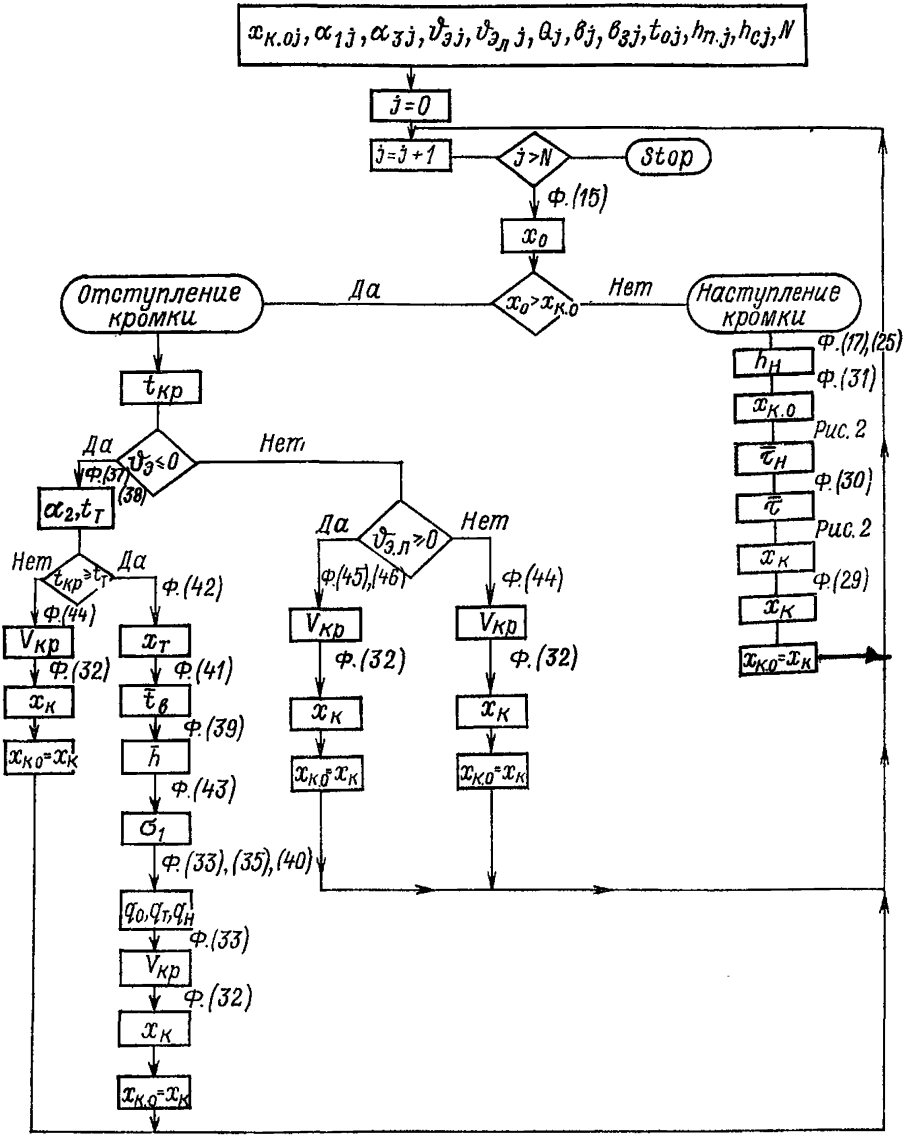


Рис. 3. Блок-схема расчета длины полыньи в течение зимнего периода
N — число расчетных временных интервалов; j — номер интервала, $j \leqslant N$.

5. РАСЧЕТ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ СТОКОВ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ

Наступление кромки льда

5.1. В режиме наступления кромки тепловой сброс оказывает влияние на длину полыньи, когда он располагается на участке нижнего бьефа с открытой водной поверхностью и на шугообразующем участке. В первом случае увеличивается длина участка охлаждения воды до 0° С, во втором случае — длина шугообразующего участка.

5.2. При впадении теплового стока мощностью $q_{ст}$ выше створа нулевой изотермы координата створа нулевой изотермы с учетом влияния теплового стока на температуру воды должна определяться формулой

$$x_{о.с} = x_с + \Delta x_с, \text{ м}, \tag{47}$$

где $x_с$ — координата створа впадения стока, м;

$$\Delta x_с = \frac{c \cdot \rho \cdot Q_\Sigma}{a_1 b_1} \ln\left(1 - \frac{t_{ст}}{\vartheta_э}\right), \tag{48}$$

Q_Σ — суммарный расход основного потока и стока.

5.3. Температуру воды всего потока в створе стока следует рассчитывать по формуле

$$t_{ст} = (t_0 - \vartheta_э)\, e^{-\frac{a_1 b_1 x_с}{c\rho Q}} + \vartheta_э + \frac{q_{ст}}{c\rho Q_\Sigma}. \tag{49}$$

5.4. После определения положения створа нулевой изотермы и температуры воды расчет длины полыньи должен производиться в соответствии с требованиями раздела 4 настоящих Рекомендаций, но за начальный створ принимается створ впадения стока, т. е. вместо x_0 и t_0 используются, соответственно, $x_{0.с}$ и $t_{ст}$, за расчетный расход воды принимается расход Q_Σ, все гидравлические и морфометрические характеристики русла должны выбираться для расхода Q_Σ.

5.5. В случае впадения стока ниже створа нулевой изотермы на шугообразующем участке длина полыньи должна рассчитываться по формуле

$$x_{к.ст} = x_к + \Delta x_{ст}, \text{ м}, \tag{50}$$

где $x_к$ — длина полыньи без учета стока, рассчитанная в соответствии с требованиями раздела 4 настоящих Рекомендаций, м; $\Delta x_{ст}$ — расстояние, на которое увеличивается полынья при таянии шуги за счет действия тепловых стоков, м.

5.6. Формулы для расчета $\Delta x_{ст}$ выбираются на основании табл. 12 в зависимости от значения параметра Ш, который представляет собой отношение объемной скрытой теплоты кристаллизации, необходимой для образования шуги расходом $Q_{ш_1}$ в основном потоке до впадения стока, к мощности теплового стока:

$$Ш = \frac{\sigma \cdot \rho_ш \cdot Q_{ш_1}}{q_{ст}}, \qquad (51)$$

где $Q_{ш_1}$ — расход шуги основного потока выше створа стока:

$$Q_{ш_1} = \overline{Q}_{ш_1} b_1 h_н V, \qquad (52)$$

параметр $\overline{Q}_{ш_1}$ должен определяться по графику $\overline{Q}_ш(X)$ (рис. 1) при

$$X = X_1 = \frac{\alpha_1 (-\vartheta_э)(x_c - x_0)}{2 h_н \sigma \rho'_ш V}. \qquad (53)$$

5.7. При условии $Ш > 1$ (табл. 12) величина $\Delta x_{ст}$ должна рассчитываться по формуле

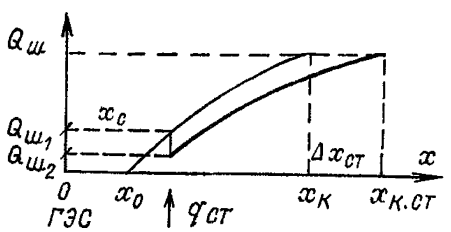
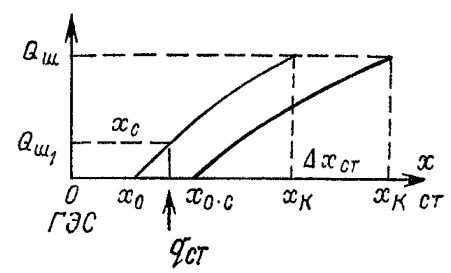
$$\Delta x_{ст} = \frac{2 h_н \sigma \rho_ш V}{\alpha_1 (-\vartheta_э)} (X_1 - X_2), \qquad (54)$$

где параметр X_1 находится по формуле (53), параметр X_2 находится по графику $\overline{Q}_ш(X)$ на рис. 1 при значении параметра $\overline{Q}_ш = \overline{Q}_{ш_2}$:

$$\overline{Q}_{ш_2} = \frac{Ш - 1}{Ш / \overline{Q}_{ш_1}}. \qquad (55)$$

5.8. При условии $Ш < 1$ (табл. 12) имеет место полное таяние шуги и нагревание воды в потоке выше нуля, при этом порядок расчета следующий.

Таблица 12

Параметр Ш	Частичное или полное таяние шуги	Изменение расхода шуги по длине потока, увеличение длины полыньи	Расчет длины полыньи по настоящим Рекомендациям
$Ш \geqslant 1$	Частичное		п. 5.7
$Ш < 1$	Полное		п. 5.8

а) Сначала необходимо определить температуру потока в створе стока:

$$t_{ст} = (t_0 - \vartheta_э)\, e^{-\frac{a_1 b_1 x_с}{c\rho Q}} + \vartheta_э - \frac{1 - Ш}{c\rho Q_{ст}}. \qquad (56)$$

б) Затем следует рассчитать длину полыньи в соответствии с требованиями раздела 4 настоящих Рекомендаций, но вместо t_0 используется значение температуры потока в створе впадения стока $t_{ст}$, рассчитанное по формуле (56).

Отступление кромки льда

5.9. Расчет длины полыньи при отступлении кромки льда должен проводиться в соответствии с требованиями раздела 4.

5.10. Температуру воды на кромке следует определять по формуле

$$t_{кр} = (t_{ст} - \vartheta_э)\, e^{-\frac{a_1 b_1 (x_к - x_с)}{c\rho Q_Ш}} + \vartheta_э, \qquad (57)$$

где температура воды в створе стока рассчитывается по формуле (49).

Приложение 1

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ, ЛЬДА, ШУГИ И СНЕГА, НЕОБХОДИМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ

Наименование физических величин	Обозначение	Численное значение
Температуропроводность льда, м²/с при 0° С при —20° С	$a_л$	 $1{,}133\times10^{-6}$ $1{,}353\times10^{-6}$
Температуропроводность снега, м²/с свежевыпавшего слежавшегося	$a_с$	 $0{,}308\times10^{-6}$ $0{,}476\times10^{-6}$
Удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К)	c	4190
Удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·К) при 0° С при —20° С	$c_л$	 2120 1960
Плотность воды, кг/м³	ρ	1000
Плотность льда, кг/м³	$\rho_л$	920
Плотность шуги, кг/м³	$\rho_ш$	400÷650
Плотность снега, кг/м³	$\rho_с$	200÷400
Теплопроводность льда, Вт/(м·К) при 0° С при —20° С	$\lambda_л$	 2,21 2,44
Теплопроводность снега, Вт/(м·К) при $\rho_с \leqslant 350$ кг/м³ при $\rho_с > 350$ кг/м³	$\lambda_с$	 $2{,}85\times10^{-6}$ $2{,}56\times10^{-6}$
Удельная теплота фазового перехода (ледообразования), Дж/кг	$\sigma_л$	$3{,}35\times10^{5}$

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Значения $(Q + q)_0$, Вт/м²

Таблица 2-1

Градусы северной широты	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
30	163	204	251	293	316	321	315	295	261	216	172	150
32	152	195	244	291	316	323	316	295	257	209	163	141
34	143	187	240	290	319	326	319	293	252	201	155	130
36	133	178	233	286	319	328	319	292	247	194	144	121
38	123	170	227	284	319	330	320	290	241	186	136	110
40	114	160	220	280	317	330	320	287	236	178	126	101
42	104	151	213	276	316	331	320	285	230	169	116	92
44	94	142	205	271	315	333	320	283	224	160	107	81
46	85	131	197	266	314	333	320	279	217	151	98	72
48	74	122	188	260	313	334	320	276	211	143	87	63
50	65	112	179	255	311	334	319	272	204	134	78	55
52	55	102	170	249	307	333	317	267	197	124	66	45
54	45	92	162	243	305	333	316	263	188	115	59	37
56	36	84	152	237	301	333	314	258	180	106	51	29
58	26	73	143	230	299	333	313	254	172	97	43	22
60	19	64	134	222	297	333	313	249	164	87	35	15
62	14	55	124	215	293	334	312	243	155	79	27	10
64	9	45	114	208	291	335	312	237	147	67	20	7
66	5	37	105	200	288	336	312	232	137	59	13	3
68	2	29	95	193	286	340	312	228	129	50	8	1
70	0	21	85	184	285	342	313	223	120	41	2	0
72	0	15	74	178	286	336	315	220	110	33	1	0
74	0	10	64	171	287	349	320	217	101	24	0	0
76	0	6	55	164	288	354	323	214	92	17	0	0
78	0	2	45	158	291	357	328	213	84	10	0	0
80	0	0	36	152	293	361	331	212	74	5	0	0
82	0	0	27	150	295	365	335	213	64	2	0	0
84	0	0	19	149	298	369	337	214	55	0	0	0
86	0	0	12	147	299	372	341	214	47	0	0	0
88	0	0	7	147	300	373	343	215	41	0	0	0
90	0	0	3	147	302	374	344	216	37	0	0	0

Таблица 2-2

Значения параметров n и $e_{пр}$ для определения коэффициента k_e

Параметры	Градусы северной широты	Месяцы											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$n \cdot 10^{-2}$	30	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,9
	40	0,9	0,9	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
	50	1,1	1,0	1,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	1,0	1,2
	60	1,4	1,2	1,0	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	1,0	1,2	1,7
	70	—	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7	1,2	1,2	—
	80	—	—	1,8	1,5	1,0	0,8	0,6	1,0	1,2	1,2	—	—
$e_{пр}$, мб	30	6,0	7,5	10,0	12,5	14,5	16,0	16,0	15,5	11,0	9,0	7,5	5,5
	40	4,5	5,0	7,0	10,0	13,0	15,0	16,0	15,5	11,0	9,0	6,0	4,0
	50	3,0	4,0	5,0	7,0	10,5	14,0	16,0	15,5	11,0	8,0	5,0	3,0
	60	2,0	2,5	3,5	5,0	8,0	11,5	14,5	14,5	10,5	7,0	4,0	1,5
	70	—	1,5	2,5	2,5	5,5	8,5	12,0	10,5	8,0	5,0	2,5	—
	80	—	—	1,0	1,5	3,5	6,0	7,5	5,5	5,0	3,0	—	—

Таблица 2-3

Значения коэффициента k_z

Градусы северной широты	Высота над уровнем моря, м							
	0	200	500	1000	1500	2000	2500	3000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
				ЯНВАРЬ				
30	1,0	1,022	1,005	1,010	1,014	1,017	1,019	1,021
40	1,0	1,003	1,007	1,017	1,025	1,032	1,036	1,043
50	1,0	1,005	1,008	1,024	1,036	1,047	1,047	1,065
60	1,0	1,006	1,016	1,032	1,047	1,062	1,075	1,088
				ФЕВРАЛЬ				
30	1,0	1,003	1,007	1,010	1,014	1,017	1,020	1,022
40	1,0	1,004	1,008	1,012	1,016	1,021	1,025	1,028
50	1,0	1,004	1,009	1,013	1,019	1,025	1,030	1,034
60	1,0	1,005	1,010	1,041	1,022	1,028	1,034	1,039
				МАРТ				
30	1,0	1,003	1,005	1,008	1,012	1,016	1,019	1,022
50	1,0	1,004	1,006	1,009	1,014	1,019	1,022	1,025
70	1,0	1,008	1,017	1,026	1,037	1,048	1,056	1,064
80	1,0	1,014	1,028	1,041	1,058	1,075	1,088	1,100
				АПРЕЛЬ				
30	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,018	1,021
60	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,018	1,021
70	1,0	1,004	1,008	1,012	1,017	1,022	1,026	1,029
80	1,0	1,005	1,010	1,015	1,021	1,027	1,032	1,037

Продолжение табл. 2-3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
				МАЙ				
30	1,0	1,003	1,007	1,010	1,014	1,018	1,021	1,024
60	1,0	1,003	1,007	1,010	1,014	1,018	1,021	1,024
80	1,0	1,003	1,007	1,010	1,014	1,018	1,021	1,024
				ИЮНЬ				
30	1,0	1,003	1,005	1,008	1,012	1,015	1,018	1,021
60	1,0	1,003	1,005	1,008	1,012	1,015	1,018	1,021
80	1,0	1,003	1,005	1,008	1,012	1,015	1,018	1,021
				ИЮЛЬ				
30	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,019	1,022
60	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,019	1,022
80	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,019	1,022
				АВГУСТ				
30	1,0	1,003	1,007	1,010	1,013	1,017	1,020	1,023
60	1,0	1,003	1,007	1,010	1,013	1,017	1,020	1,023
80	1,0	1,005	1,009	1,014	1,020	1,025	1,030	1,035
				СЕНТЯБРЬ				
30	1,0	1,003	1,005	1,008	1,012	1,016	1,019	1,022
50	1,0	1,003	1,006	1,009	1,013	1,017	1,021	1,025
70	1,0	1,005	1,010	1,015	1,022	1,028	1,034	1,041
80	1,0	1,007	1,014	1,020	1,029	1,038	1,077	1,055
				ОКТЯБРЬ				
30	1,0	1,003	1,006	1,009	1,012	1,016	1,019	1,022
50	1,0	1,003	1,006	1,010	1,014	1,019	1,022	1,028
60	1,0	1,003	1,007	1,010	1,015	1,020	1,024	1,028
70	1,0	1,008	1,016	1,023	1,034	1,044	1,052	1,061
80	1,0	1,012	1,024	1,036	1,062	1,067	1,081	1,095
				НОЯБРЬ				
30	1,0	1,003	1,006	1,009	1,013	1,017	1,020	1,023
40	1,0	1,005	1,010	1,015	1,021	1,027	1,032	1,037
50	1,0	1,007	1,014	1,021	1,026	1,037	1,011	1,051
60	1,0	1,009	1,017	1,026	1,036	1,047	1,055	1,064
				ДЕКАБРЬ				
30	1,0	1,003	1,007	1,010	1,013	1,016	1,018	1,021
40	1,0	1,006	1,013	1,013	1,027	1,035	1,041	1,048
50	1,0	1,009	1,018	1,038	1,041	1,054	1,064	1,075
60	1,0	1,013	1,026	1,039	1,056	1,073	1,088	1,103

Таблица 2-4

Значения среднесуточного коэффициента $k_н$

Месяцы	Градусы северной широты					
	30	40	50	60	70	80
I	0,69	0,70	0,73	0,78	0,85	—
II	0,68	0,69	0,71	0,74	0,79	0,85
III	0,67	0,67	0,69	0,71	0,73	0,78
IV	0,66	0,66	0,68	0,69	0,70	0,73
V	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0.70
X	0,67	0.68	0,70	0,73	0,77	0,81
XI	0,68	0,70	0,72	0,76	0,82	—
XII	0,69	0,71	0,73	0,79	—	—

Таблица 2-5

Значения среднесуточного коэффициента $k_{в+с}$

Месяцы	Градусы северной широты					
	30	40	50	60	70	80
I	0,43	0,47	0,51	0,55	0,58	—
II	0,40	0,44	0,48	0,51	0,56	0,58
III	0,36	0,40	0,43	0,47	0,51	0,55
IV	0,33	0,36	0,39	0,43	0,47	0,50
V	0,30	0,33	0,36	0,40	0,43	0,47
X	0,38	0,42	0,46	0,50	0,53	0,58
XI	0,41	0,46	0,50	0,54	0,57	—
XII	0,44	0,48	0,52	0,57	—	—

Таблица 2-6

Значения среднесуточного альбедо водной поверхности, *A*

Месяцы	Облачность, доли единицы		Градусы северной широты					
			30	40	50	60	70	80
I	0	0	0,08	0,13	0,20	0,27	—	—
	0,5	0	0,08	0,12	0,17	0,24	—	—
	0,5	0,5	0,08	0,13	0,18	0,25	—	—
	1,0	0	0,08	0,08	0,09	0,09	—	—
	1,0	0,5	0,08	0,08	0,09	0,09	—	—
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	—	—
II	0	0	0,06	0,09	0,12	0,19	0,44	—
	0,5	0	0,07	0,08	0,11	0,17	0,33	—
	0,5	0,5	0,07	0,09	0,11	0,19	0,38	—
	1,0	0	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08	—
	1,0	0,5	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	—
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	—
III	0	0	0,05	0,06	0,08	0,11	0,20	0,37
	0,5	0	0,06	0,06	0,08	0,11	0,18	0,27
	0,5	0,5	0,06	0,07	0,08	0,12	0,20	0,29
	1,0	0	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09
	1,0	0,5	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
IV	0	0	0,05	0,05	0,06	0,08	0,12	0,19
	0,5	0	0,05	0,06	0,06	0,08	0,11	0,15
	0,5	0,5	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,16
	1,0	0	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09
	1,0	0,5	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
V	0	0	0,05	0,05	0,05	0,07	0,10	0,13
	0,5	0	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11
	0,5	0,5	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12
	1,0	0	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09
	1,0	0,5	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
X	0	0	0,06	0,08	0,10	0,14	0,33	—
	0,5	0	0,07	0,08	0,09	0,12	0,25	—
	0,5	0,5	0,07	0,08	0,09	0,13	0,29	—
	1,0	0	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	—
	1,0	0,5	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	—
	1,0	1,0	0,98	0,08	0,08	0,08	0,08	—
XI	0	0	0,07	0,11	0,17	0,26	0,46	—
	0,5	0	0,07	0,10	0,15	0,22	0,34	—
	0,5	0,5	0,07	0,11	0,16	0,24	0,39	—
	1,0	0	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	—
	1,0	0,5	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	—
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	—
XII	0	0	0,08	0,13	0,20	0,26	—	—
	0,5	0	0,08	0,12	0,16	0,22	—	—
	0,5	0,5	0,08	0,12	0,18	0,26	—	—
	1,0	0	0,08	0,08	0,08	0,09	—	—
	1,0	0,5	0,08	0,08	0,08	0,08	—	—
	1,0	1,0	0,08	0,08	0,08	0,08	—	—

Таблица 2-7

Значения величины b'

Абсолютная влажность воздуха e, мб	Общая облачность n_0				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
0,1	0,53	0,42	0,32	0,21	0,11
0,2	0,57	0,46	0,34	0,23	0,11
0,4	0,62	0,49	0,37	0,25	0,12
0,6	0,64	0,51	0,38	0,26	0,13
0,8	0,65	0,52	0,39	0,26	0,13
1,0	0,67	0,53	0,40	0,27	0,13
1,5	0,69	0,55	0,42	0,28	0,14
2,0	0,71	0,57	0,43	0,28	0,14
4,0	0,75	0,60	0,45	0,30	0,15
6,0	0,77	0,62	0,46	0,31	0,15
8,0	0,78	0,63	0,47	0,31	0,16
10,0	0,79	0,64	0,48	0,32	0,16
20,0	0,83	0,66	0,50	0,33	0,17
30,0	0,84	0,68	0,51	0,34	0,17

Примечание. При $n_0 = 1$ (сплошная облачность) $b' = 0$.

Таблица 2-8

Значения величины b''

Общая облачность n_0	Нижняя облачность $n_н$					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,1	0	—	—	—	—	—
0,2	0,17	0,19	—	—	—	—
0,4	0,34	0,36	0,39	—	—	—
0,6	0,51	0,53	0,56	0,58	—	—
0,8	0,68	0,70	0,73	0,75	0,78	—
1,0	0,85	0,87	0,90	0,92	0,95	0,97

Таблица 2-9

Значения величины σT_{200}^4, Вт/м²

ϑ, °С	Десятые доли градуса									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	321	321	322	322	322	323	323	323	324	324
1	324	326	326	326	327	327	328	328	329	329
2	330	330	330	331	333	333	334	334	334	335
3	335	335	336	336	336	337	337	338	338	340
4	340	340	341	341	341	342	342	343	344	344
5	344	344	345	345	345	347	347	347	348	349
6	349	350	350	351	351	351	352	352	353	354
7	355	355	356	356	357	358	358	358	359	359
8	359	361	361	362	363	363	363	363	363	364
9	365	365	366	366	366	367	368	369	370	370
10	370	371	371	372	372	373	374	374	374	375
11	376	377	377	377	378	379	379	379	380	380
12	381	382	383	383	384	384	385	385	386	386
13	386	387	387	388	388	389	390	391	391	391
14	392	392	393	393	393	394	394	395	396	397
15	397	397	398	398	399	399	400	401	401	401
16	402	403	404	404	405	405	406	406	407	407
17	408	408	409	411	411	412	412	412	413	413
18	414	414	415	416	417	418	418	418	419	419
19	420	420	421	421	422	422	422	423	424	424
20	426	426	426	427	428	428	428	429	429	430

Таблица 2-10

Среднеширотные значения коэффициента k

Градусы северной широты	30	40	50	60	70
k	0,32	0,33	0,36	0,40	0,50

Таблица 2-11

Среднеширотные значения коэффициента c_1

Градусы сев. широты	30	40	50	60	70
c_1	0,63	0,68	0,72	0,76	0,80

Таблица 2-12

Эффективное излучение при безоблачном небе I, Вт/м²

Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, мб				
	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
—20	77	—	—	—	—
—10	91	84	—	—	—
0	105	98	84	—	—
10	119	112	98	91	77
20	—	—	112	105	91

РАСЧЕТ ДЛИНЫ УЧАСТКА МЕЖДУ СТВОРАМИ НУЛЕВОЙ ИЗОТЕРМЫ И НАЧАЛА ВНУТРИВОДНОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Начало процесса внутриводного ледообразования возможно при выполнении трех условий [10, 12] — переохлаждения воды, наличия устойчивых зародышей льда и отвода теплоты кристаллизации от границы фазового перехода. Участок от створа нулевой изотермы до створа, в котором начинается образование кристаллов внутриводного льда, может быть весьма протяженным и составлять несколько километров, поэтому длину этого участка необходимо оценивать при проведении расчета длины полыньи. Расчет длины участка между створами нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования следует проводить на основании зависимостей, представленных в [16]:

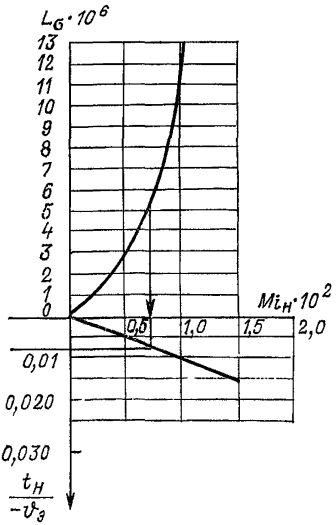
$$L_\sigma = \left(1 - e^{-\mathrm{Mi}_н}\right) \times \left(\mathrm{Mi}_н + e^{-\mathrm{Mi}_н} - 1\right)^{2/3}, \quad (1)$$

где

$$L_\sigma = 9{,}1 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\alpha_1^2 b^2 V}{\vartheta_э^4 Q^2}\right)^{1/3};$$

$$\mathrm{Mi}_н = \frac{\alpha_1 b (x_н - x_0)}{c\rho Q};$$

$x_н$ — координата створа начала внутриводного ледообразования; x_0 — положение створа нулевой изотермы, вычисляемое по формуле (15) настоящих Рекомендаций. Номограмма, позволяющая рассчитывать величину $x_н - x_0$ и температуру воды в створе начала внутриводного ледообразования $t_н$, построенная по приведенной зависимости (1), представлена на рисунке.



Номограмма для расчета длины участка между створами нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования.

Для иллюстрации расчета длины участка между створами нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования в этом приложении рассмотрен пример с теми же исходными данными, что и в примере 1 приложения 4, но при $\vartheta_э = -2{,}5°$ С.

Для $Q = 500$ м³/с, $b = 280$м, $V = 1$ м/с, $\alpha_1 = 12$ Вт/(м²·К), $\vartheta_э = -2{,}2°$ С параметр $L_\sigma = 11{,}4 \cdot 10^{-8}$. Аппроксимируя график

$L_\sigma \equiv f(\mathrm{Mi}_н)$ в области L_σ от 0 до 10^{-6} зависимостью $L_\sigma = 11{,}4 \times 10^{-4}\ \mathrm{Mi}_н$ и используя эту зависимость, можно найти $\mathrm{Mi}_н = 2{,}8 \cdot 10^{-4}$, откуда длина участка между створами нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования $x_н - x_0 = 175$ м.

Приложение 4

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. В нижнем бьефе ГЭС ширина заберегов в предледоставный период в районе кромки льда $b_{э.0} = 80$ м, забереги наблюдаются только на шугообразующем участке. Ледостав наступает 10 ноября. Толщина льда, измеренная у берега в районе кромки 15 ноября, $h_{л.0} = 0{,}32$ м. Расход воды в нижнем бьефе $Q = 500$ м³/с, скорость течения $V = 1$ м/с, ширина $b = 280$ м, температура воды в начале нижнего бьефа $t_0 = 3°$ С, коэффициенты теплоотдачи от воды к воздуху и льду и эквивалентная температура воздуха $\alpha_л = \alpha_з = 12$ Вт/(м·К), $\vartheta_э = -28°$ С, эквивалентная температура воздуха надо льдом $\vartheta_{э.л} = -18°$ С, плотность шуги $\rho_ш = 560$ кг/м³.

Найти начальное положение кромки льда.

Решение.

1. Положение створа нулевой изотермы определяется по формуле (15):

$$x_0 = \frac{c\rho Q}{\alpha_1 b} \ln\left(1 - \frac{t_0}{\vartheta_э}\right) = \frac{4{,}19 \cdot 10^6 \cdot 500}{12 \cdot 280} \ln\left(1 + \frac{3}{28}\right) = 63462 \text{ м}.$$

2. Толщина льда на кромке рассчитывается по формуле (25); продолжительность периода от даты ледостава до даты измерения толщины льда составляет 5 дней (с 10 по 15 ноября):

$$h_н = -\frac{\lambda_л}{\alpha_з} + \sqrt{\left(h_{л.0} + \frac{\lambda_л}{\alpha_з}\right)^2 + \frac{2\lambda_л \vartheta_{э.л} \tau_л}{\sigma_л \rho_л}} =$$

$$= -\frac{2{,}3}{12} + \sqrt{(0{,}32 + 2{,}3/12)^2 - \frac{2 \cdot 2{,}3 \cdot 18\,(15-10)\,24 \cdot 3600}{3{,}08 \cdot 10^8}} = 0{,}19 \text{ м}.$$

3. Степень покрытия шугой водной поверхности вблизи кромки перед установлением ледостава при полном покрытии поверхности заберегами и шугой рассчитывается по формуле (28):

$$\beta_{ш.0} = 1 - \frac{b_{э.0}}{b} = 1 - 80/280 = 0{,}714.$$

4. Параметр координаты, соответствующий начальному положению кромки, находится по рис. 1, исходя из величины $\beta_ш = 0{,}714$:

$$X_н = 0{,}8.$$

5. Начальное положение кромки рассчитывается по формуле (26):

$$x_{к.н} = \frac{2h_н \sigma_л \rho_ш V}{\alpha_1 (-\vartheta_э)} X_н + x_0 = \frac{2 \cdot 0{,}19 \cdot 3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560 \cdot 1 \cdot 0{,}8}{12 \cdot 28} + 63462 = 158142 \text{ м}.$$

Пример 2. На начало третьей декады ноября (20 ноября) длина полыньи в нижнем бьефе составляла $x_{к.0} = 100000$ м. Температура воды, сбрасываемой с ГЭС в нижний бьеф, $t_0 = 2{,}8°$ С; расход воды $Q = 500$ м³/с; $V = 1$ м/с, $b = 280$ м, ширина заберегов по всему нижнему бьефу в среднем $b_{з.0} = 80$ м, $\alpha_1 = 12$ Вт/(м²·К), $\vartheta_э = -32°$ С, коэффициенты шероховатости русла и нижней поверхности шуги $n_р = 0{,}05$, $n_ш = 0{,}015$, плотность шуги $\rho_ш = 560$ кг/м³.

Найти длину полыньи в конце третьей декады ноября (30 ноября) ($\tau_f = 10$ сут $= 10 \cdot 24 \cdot 3600$ с $= 864000$ с).

Решение.

1. Положение створа нулевой изотермы определяется по формуле (15) с учетом требований п. 4.3 настоящих Рекомендаций:

$$x_0 = \frac{c_р Q}{\alpha_1 b_1} \ln\left(1 - \frac{t_0}{\vartheta_э}\right) = \frac{4{,}19 \cdot 10^6 \cdot 500}{12\,(280 - 80)} \ln(1 + 2{,}8/32) = 73221 \text{ м}.$$

Так как $x_0 < x_{к.0}$, то в соответствии с п. 1 табл. 11 имеет место наступление кромки.

2. Толщина льда на кромке определяется в соответствии с п. 4.7 настоящих Рекомендаций:

$$n_{пр} = \frac{(n_р^{3/2} + n_ш^{3/2})^{2/3}}{2} = \frac{(0{,}05^{3/2} + 0{,}015^{3/2})^{2/3}}{2} = 0{,}027.$$

$$H = Q/(bV) = 500/(280 \cdot 1) = 1{,}78 \text{ м}, \quad R \approx H = 1{,}78 \text{ м},$$

$$C = R^{1/6}/n_{пр} = 1{,}78^{1/6}/0{,}027 = 40{,}8 \text{ м}^{0{,}5}/\text{с},$$

$$h_н = 1{,}77 \frac{V^2 b_1}{C^2} = \frac{1{,}77 \cdot 1^2 (280 - 80)}{40{,}8^2} = 0{,}212 \text{ м}.$$

3. Параметр $X_{к.0}$ рассчитывается по формуле (31):

$$X_{к.0} = \frac{\alpha_1 (-\vartheta_э)(x_{к.0} - x_0)}{2 h_н \sigma_л \rho_ш V} = \frac{(100000 - 73221) \cdot 12 \cdot 32}{2 \cdot 0{,}212 \cdot 3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560} = 0{,}129.$$

4. Параметр $\bar{\tau}_н$ находится по графику $\bar{\tau}(X_к)$ на рис. 2 при $X = X_{к.0} = 0{,}129$:

$$\bar{\tau}_н = 82{,}5.$$

5. Параметр $\bar{\tau}$ рассчитывается по формуле (30):

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_н - \frac{\alpha_1 \vartheta_э \tau_f}{2 h_н \sigma_л \rho_ш} = 82{,}5 + \frac{12 \cdot 32 \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600}{2 \cdot 0{,}212 \cdot 3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560} = 86{,}7.$$

6. Параметр $X_к$ находится по графику $\bar{\tau}(X_к)$ на рис. 2 при $\bar{\tau} = 86{,}7$:

$$X_к = \mathbf{0{,}06}.$$

7. Положение кромки льда в конце третьей декады рассчитывается по формуле (29):

$$x_к = \frac{X_к}{X_{к.0}}(x_{к.0} - x_0) + x_0 = \frac{0{,}060}{0{,}128}(100000 - 73221) + 73221 = 85773 \text{ м}.$$

Пример 3. Исходные данные те же, что и в примере 2, но $\vartheta_э = -8°\,С$, $\vartheta_{э,л} = -2°\,С$, $\alpha_1 = 12$ Вт/(м^2·К). Толщина слоя снега на льду $h_с = 0{,}1$ м, толщина льда в нижнем бьефе $h_{л.0} = 0{,}2$ м.

Найти длину полыньи в конце третьей декады ноября (30 ноября).

Решение.

1. Положение створа нулевой изотермы определяется по формуле (15) с учетом требований п. 4.4 настоящих Рекомендаций:

$$x_0 = \frac{c\rho Q}{\alpha_1 b_1} \ln\left(1 - \frac{t_0}{\vartheta_э}\right) = \frac{4{,}19\cdot 10^6 \cdot 500}{12\,(280-80)} \ln(1 + 3/8) = 278000 \text{ м}.$$

Так как $x_0 > x_{к.0}$, то в соответствии с п. 2 табл. 11 имеет место отступление кромки льда.

2. Температура воды на кромке рассчитывается по формуле (35) при $x = x_{к.0}$:

$$t_{кр} = (t_0 - \vartheta_э)\, e^{-\frac{\alpha_1 b x_{к.0}}{c\rho Q}} + \vartheta_э = (2{,}8 + 8)\, e^{-\frac{12\cdot 280\cdot 100000}{4{,}19\cdot 10^6\cdot 500}} - 8 = 1{,}2\,°\text{C}.$$

3. Приведенная толщина льда находится по формуле (39):

$$\overline{h} = \frac{h_{л.0} + h_с \sqrt{\frac{a_л}{a_с}}}{2} = \frac{0{,}2 + 0{,}1\sqrt{0{,}308\cdot 10^{-6}/(1{,}13\cdot 10^{-6})}}{2} = 0{,}126 \text{ м}.$$

4. Температура воды под ледяным покровом, при которой прекращается таяние льда на нижней поверхности, рассчитывается по формулам (37), (38):

$$\text{Bi} = \alpha_3 \overline{h}/\lambda_л = 12\cdot 0{,}126/2{,}32 = 0{,}652,$$

$$t_т = \frac{-\alpha_1 \vartheta}{2640\, V(1 + \text{Bi})} = \frac{12\cdot 4}{2640\cdot 1\,(1+0{,}652)} = 0{,}011\,°\text{C}.$$

5. По формуле (43) определяется величина σ_1:

$$\sigma_1 = \sigma_л - \frac{c_л \rho_л \vartheta\, \text{Bi}}{2\cdot\rho\,(\text{Bi}+1)} = 335200 + \frac{2120\cdot 920\cdot 0{,}652}{2\cdot 1000\cdot 1{,}652}\cdot 4 =$$

$$= 336873 \text{ Дж/кг}.$$

6. Длина участка таяния рассчитывается по формуле (42):

$$x_т = \frac{c\rho Q}{2640\, Vb} \ln\frac{t_{кр}}{t_т} = \frac{4{,}19\cdot 10^6\cdot 500}{2640\cdot 1\cdot 280} \ln\frac{1{,}2}{0{,}011} = 13298 \text{ м}.$$

7. Средняя температура воды подо льдом на участке таяния определяется по формуле (41):

$$\text{Mi}_т = \frac{2640\, Vbx_т}{c\rho Q} = \frac{2640\cdot 1\cdot 280\cdot 13298}{4{,}19\cdot 10^6\cdot 500} = 4{,}69,$$

$$\overline{t}_в = t_{кр}\frac{1 - e^{-\text{Mi}_т}}{\text{Mi}_т} = 1{,}2\,\frac{1 - e^{-4{,}69}}{4{,}69} = 0{,}253.$$

8. Скорость отступления кромки находится по формулам (33), (34), (36), (40):

$$q_0 = c\rho Q t_{кр} = 4190 \cdot 1000 \cdot 500 \cdot 1{,}2 = 2{,}51 \cdot 10^9 \text{ Вт},$$

$$q_т = c\rho Q t_т = 4190 \cdot 1000 \cdot 500 \cdot 0{,}011 = 2{,}3 \cdot 10^7 \text{ Вт},$$

$$q_н = bx_т\left(\alpha_2 \bar{t}_в + \frac{\vartheta_{э.л}}{1/\alpha_3 + \bar{h}/\lambda_л}\right) =$$

$$= 280 \cdot 13298\left(2640 \cdot 1 \cdot 0{,}253 - \frac{2}{1/12 + 0{,}126/2{,}3}\right) = 2{,}43 \cdot 10^9 \text{ Вт}.$$

$$V_{кр} = \frac{1}{\sigma_1 \rho_л \bar{h} b}(q_0 - q_т - q_н) = \frac{10^9}{3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 920 \cdot 0{,}126 \cdot 280}(2{,}51 - 0{,}023 -$$

$$- 2{,}43) = 0{,}0052 \text{ м/с}.$$

9. Длина полыньи в конце расчетного периода рассчитывается по формуле (32):

$$x_к = x_{к.0} + V_{кр}\tau_j = 100000 + 0{,}0052 \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600 = 104529 \text{ м}.$$

Пример 4. Исходные данные те же, что и в примере 2, но в створе $x_с = 85000$ м действует тепловой сброс мощностью $q_{ст} = 10^8$ Вт. Расход воды ниже створа стока $Q_2 = 650$ м³/с.

Найти длину полыньи в конце третьей декады ноября.

Решение.

1. Положение створа нулевой изотермы определяется по формуле (15) с учетом требований п. 4.4 настоящих Рекомендаций:

$$x_0 = \frac{c\rho Q}{\alpha_1 b} \ln\left(1 - \frac{t_0}{\vartheta_э}\right) = \frac{4{,}19 \cdot 10^6 \cdot 500}{12(280 - 80)} \ln(1 + 2{,}8/32) = 73221 \text{ м}.$$

Так как $x_0 < x_с$, то сток расположен на шугообразующем участке.

2. Безразмерный параметр координаты при $x = x_с$ определяется по формуле (53):

$$X_1 = \frac{\alpha_1(-\vartheta_э)(x_с - x_0)}{2h_н \sigma_л \rho_ш V} = \frac{(85000 - 73221)\,12 \cdot 32}{2 \cdot 0{,}212 \cdot 3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560 \cdot 1} = 0{,}0567 \approx 0{,}06.$$

3. Безразмерный параметр расхода шуги в створе стока определяется по графику (рис. 1) при $X \equiv X_1 = 0{,}06$:

$$\bar{Q}_{ш_1} = 0{,}022.$$

4. Объемный расход шуги в створе стока определяется по формуле (52):

$$Q_{ш_1} = \bar{Q}_{ш_1} b_1 h_н V = 0{,}022(280 - 80) \cdot 0{,}212 \cdot 1 = 0{,}94 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. Параметр Ш рассчитывается по формуле (51):

$$Ш = \frac{\sigma_л \rho_ш Q_{ш_1}}{q_{ст}} = \frac{3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560 \cdot 0{,}94}{10^8} = 1{,}76.$$

Так как Ш > 1, то согласно табл. 12 шуга в створе стока тает частично.

6. Параметр расхода шуги после ее таяния рассчитывается по формуле (55):

$$\overline{Q}_{ш_2} = \frac{Ш - 1}{Ш/Q_{ш_1}} = \frac{1{,}76 - 1}{1{,}76/0{,}022} = 0{,}0095.$$

7. Безразмерный параметр координаты, соответствующий $\overline{Q}_{ш_2}$, находится по рис. 1 при $\overline{Q}_{ш} \equiv \overline{Q}_{ш_2} = 0{,}0095$:

$$X_2 = 0{,}01.$$

8. Увеличение длины шугообразующего участка при таянии шуги за счет теплового стока определяется по формуле (54):

$$\Delta x_{ст} = \frac{2h_{н}\sigma_{д}\rho_{ш}V}{\alpha_1(-\vartheta_э)}(X_1 - X_2) = \frac{2 \cdot 0{,}212 \cdot 3{,}35 \cdot 10^5 \cdot 560 \cdot 1 \cdot (0{,}05 - 0{,}01)}{12 \cdot 32} =$$

$$= 8285 \text{ м}.$$

9. Длина полыньи в нижнем бьефе в данном примере определяется по формуле (50):

$$x_{к.\,ст} = x_к + \Delta x_{ст} = 85773 + 8285 = 94058 \text{ м}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пехович А. И., Трегуб Г. А.** Расчет шугообразования и движения кромки ледяного покрова в нижних бьефах ГЭС//Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: Сборник научных трудов. — 1980. — Т. 143. — С. 87—91.

2. **Трегуб Г. А.** Метод расчета длины полыньи в нижних бьефах ГЭС// Матер. конф. и совещ. по гидротехнике: Борьба с ледовыми затруднениями на реках и водохранилищах при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1984. — С. 18—23.

3. **Чижов А. Н.** Образование внутриводного льда и формирование шугохода на горных реках // Труды ГГИ. — 1962. — Вып. 93. — С. 3—23.

4. **Донченко Р. В.** Модель процесса замерзания рек//Труды ГГИ. — 1980. — Вып. 270. — С. 3—11.

5. **Донченко Р. В.** Физические свойства внутриводного льда (шуги)// Труды ГГИ. — 1956. — Вып. 55 (109). — С. 5—40.

6. **Берденников В. П.** Физические характеристики льда заторов и зажоров//Труды ГГИ. — 1965. — Вып. 129. — С. 19—43.

7. **Рекомендации** по термическому расчету водохранилищ: $\frac{\text{П 78—79}}{\text{ВНИИГ}}$. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 30 с.

8. **Рекомендации** по расчету зажорных явлений в нижних бьефах ГЭС. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 30 с.

9. **Пехович А. И., Жидких В. М.** Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976. — 352 с.

10. **Пехович А. И.** Основы гидроледотермики. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983. — 200 с.

11. **Шаталина И. Н.** О расчете коэффициента теплоотдачи при обтекании поверхностей достаточно большой длины//Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1975. — Т. 109 — С. 140—148.

12. **Лед** в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС // Я. Л. Готлиб, Р. В. Донченко, А. И. Пехович, И. Н. Соколов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 197 с.

13. **Нежиховский Р. А.** Расчеты и прогнозы стока шуги и льда в период замерзания рек//Труды ГГИ. — 1963. — Вып. 103. — С. 3—40.

14. **Чижов А. Н.** О расчетах толщины ледяного покрова на реках и водохранилищах // Труды ГГИ. — 1980. — Вып. 270. — С. 40—55.

15. **Ляпин В. Е., Трегуб Г. А., Разговорова Е. Л.** Ледотермический режим нижних бьефов ГЭС и влияние на него тепловых стоков//Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. — М. 1985. — С. 263—269.

16. **Ляпин В. Е., Трегуб Г. А., Разговорова Е. Л.** Методы прогноза и регулирования ледотермических явлений в нижних бьефах высоконапорных

ГЭС//Матер. конф. и совещ. по гидротехнике: Инженерное мерзлотоведение в гидротехническом строительстве/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1984. — С. 158—163.

17. **Крицкий С. Н., Менкель М. Ф., Россинский К. И.** Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1947. — 154 с.

18. **Назаренко С. Н., Кожевникова Т. Е., Сулимова Л. И.** Опыт прогнозирования элементов ледотермического режима нижних бьефов ГЭС//Гидротехническое строительство. — 1980. — № 9. — С. 40—43.

19. **Руководство** по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 283 с.

20. **Донченко Р. В.** Экспериментальные исследования испарения с поверхности льда//Труды ГГИ. — 1968. — Вып. 159. — С. 56—60.

21. **Берденников В. П.** Динамические условия образования заторов льда на реках//Труды ГГИ. — 1964. — Вып. 110. — С. 3—11.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. Основные положения 4
2. Перечень необходимых исходных данных 5
3. Расчет составляющих теплового баланса при теплообмене воды и льда с воздухом 9
4. Расчет длины полыньи 12
5. Расчет длины полыньи с учетом влияния тепловых стоков в нижнем бьефе 20

Приложение 1. Физические свойства воды, льда, шуги, снега, необходимые при расчете длины полыньи 23

Приложение 2. Справочные таблицы 24

Приложение 3. Расчет длины участка между створами нулевой изотермы и начала внутриводного ледообразования 31

Приложение 4. Примеры расчета 32

Список литературы 37

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ДЛИНЫ ПОЛЫНЬИ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГЭС

П 28-86
ВНИИГ

Научный редактор *В. А. Кякк*
Редактор *Р. Н. Тиназова*
Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Сдано в набор 16.09.86. Подписано в печать 31.12.86.
М-33174. Формат 60×90 1/16. Бумага типографская № 1.
Литературная гарнитура. Высокая печать. Печ. л. 2,5.
Кр.-отт. 2,625. Уч.-изд. л. 2,73. Тираж 500. Заказ 427. Цена 40 к.
Типография ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева.
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru