

# Расчет толщины льда на основе статистических данных о метеорологических условиях местности



**Горгуца Р. Ю.**

*к. т. н., главный инженер  
ООО «Морстройтехнология»*



**Миронов М. Е.**

*д. т. н., профессор,  
главный специалист ОАО  
«ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»*

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы расчета толщины ровного (неторосистого) льда на основе статистических данных о метеорологических условиях местности.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, индекс намерзания льда, толщина льда, расчетные и натурные данные.

**Abstract:** This article discusses about calculation ice thickness (without ridges) on basis of statistical data on weather conditions areas.

**Key words:** hydraulic structures, freezing index, ice thickness, design and field data.

При проектировании гидротехнических сооружений (ГТС) на замерзающих акваториях рек и каналов, озер и водохранилищ, заливов и морей весьма важной является оценка ледовых нагрузок и воздействий на преграды.

К настоящему времени, благодаря многолетним усилиям российских и зарубежных ученых, разработаны достаточно достоверные методики расчета ледовых нагрузок на сплошные и отдельно стоящие преграды в составе ГТС [1].

Однако в проектной практике встречаются случаи неверной интерпретации нормативных положений, относящихся к расчету ледовых нагрузок.

В состав исходных данных для расчета ледовых нагрузок на ГТС, в первую очередь, входит толщина льда. Сведения о толщине льда требуются также при моделировании ледовых режимов акваторий, разработке мер по сокращению ущерба от заторных и зазорных наводнений, исследовании страховых рисков и др.

Для определения толщины льда с достаточной степенью достоверности натурные наблюдения за ледовой обстановкой в районе строительства должны проводиться не менее 5 лет [12]. Также следует отметить, что натурные наблюдения за ледовой обстановкой и ос-

новными параметрами льда ведутся зачастую на неподвижном припае, а не в период подвижек льда, когда наиболее вероятны наибольшие ледовые нагрузки на ГТС.

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет) ведет многолетние гидрометеорологические наблюдения на реках и каналах, озерах и водохранилищах, заливах и морях. По результатам наблюдений регулярно выпускаются режимно-справочные издания и монографии (метеорологические ежемесячники и ежегодники, справочники по климату, гидрологические ежегодники и др.).

В метеорологических ежемесячниках публикуются данные о максимальных, минимальных и среднесуточных температурах наружного воздуха. В гидрологических ежегодниках приводятся полученные гидрологическими станциями и постами сведения об уровнях, расходах воды и пр. Однако эти издания архивируются в бумажном виде, и доступ к ним затруднен.

В связи со сложностью физических процессов образования и развития льда в данной статье предлагается инженерная методика расчета толщины льда с учетом метеорологических данных, полученных из открытых источников.

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Ледяное покрытие акваторий образуется в результате различных процессов. Формирование ровного ледяного покрова происходит в значительной степени под влиянием процессов теплообмена между водой и атмосферой. Ровный ледяной покров на акваториях встречается в виде припая, а также вдоль краев льда на границах с открытой водой. В монографии [2] содержится подробное описание процессов теплопередачи на начальной и последующих стадиях льдообразования.

Формирование ледяного покрова также связано с механическими процессами взаимодействия между отдельными льдинами. Относительно низкоэнергетические процессы (например, слабое взаимодействие между льдинами одного слоя, сопровождаемое их смерзанием) могут сменяться высокоэнергетическими процессами (например, образованием торосов и заторов, вызванным интенсивным движением и разрушением льдин). Ледяные поля также могут утолщаться в результате образования наледей и замораживания снега на поверхности льда, или путем смерзания шуги под поверхность.

Снежный покров на верхней части льда изолирует его, тем самым снижая теплообмен и уменьшая рост толщины льда. При средних и суровых ветровых условиях теплообмен будет расти, а толщина льда – увеличиваться.

При продолжительном периоде времени с положительными температурами, а также при прямом воздействии солнечной радиации на открытую поверхность льда происходит его деградация, сопровождаемая уменьшением толщины льда.

Образование и развитие ледяного покрова исследовано в многочисленных работах [например, 3–5]. Отмечается, что пока не представляется возможным надежно предсказывать толщину льда, подверженного динамическим процессам, но с помощью консервативных оценок можно учесть динамику на основе данных о статическом формировании льда.

### ТЕРМИЧЕСКИЙ РОСТ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

После образования лед начинает утолщаться благодаря обмену теплом с атмосферой. Для установленного температурного режима в ледяном поле расчет толщины льда может быть выполнен с помощью индекса намерзания льда  $R_d$ , °С сут, определяемого по формуле:

$$R_d = \sum_{i=1}^N (t_b - t_{u,i}), \quad (1)$$

где  $N$  – число суток в месяцах с отрицательной температурой от начала образования ледяного покрова до рассматриваемого периода;  $t_b$  – температура льда на границе лед – вода, °С, принимаемая равной температуре замерзания воды в месте определения толщины льда по формуле:

$$t_b = -0,057S_w, \quad (2)$$

где  $S_w$  – соленость морской воды, ‰;  $t_{u,i}$  – средняя отрицательная температура льда на границе воздух (или снег) – лед в  $i$ -ых сутках, °С, определяемая по формуле:

$$t_{u,i} = (t_{a,i} - t_b) \frac{h_d / \lambda_d}{1 / \alpha_t + h_d / \lambda_d + h_s / \lambda_s}, \quad (3)$$

где  $t_{a,i}$  – температура воздуха в  $i$ -ых сутках, °С, принимаемая по данным измерений на гидрометстанциях (ГМС) Росгидромета;  $h_d$  – толщина ледяного поля в предыдущие сутки, м;  $h_s$  – толщина снежного покрова в предыдущие сутки, м, принимаемая по данным измерений на ГМС;  $\lambda_d$  и  $\lambda_s$  – теплопроводность льда и снега, соответственно, Вт/(м·°К);  $\alpha_t$  – коэффициент теплоотдачи на границе лед – воздух, Вт/(м²·°К), определяемый по формуле [6]:

$$\alpha_t = K \cdot V_w; \quad (4)$$

здесь  $K$  – коэффициент, принимаемый по табл. 1;  $V_w$  – скорость ветра, м/с.

Отрицательные значения  $R_d$  отражают собой температуру, выше точки замерзания, а положительные – температуру, ниже точки замерзания. Нулевое значение  $R_d$  назначается для даты в конце осени или в начале зимы, после которой кривая  $R_d$  идет вверх с последовательно положительным наклоном. На рис. 1 показан пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и индексом намерзания льда  $R_d$ .

Толщину льда  $h_d$  рекомендуется определять по следующей формуле:

$$h_d = \left( \frac{2\lambda_d R_d}{\rho_d L} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\lambda_d$  – теплопроводность соленого льда, Вт/(м·°С), определяемая по формуле [7]:

$$\lambda_d = \lambda_0 + \frac{\beta \cdot S_d}{t_u - 273}. \quad (6)$$

Здесь  $\lambda_0$  – теплопроводность пресного льда, принимаемая в зависимости от температуры воздуха  $t_a$  по табл. 2;  $\beta = 0,13$  Вт/м;  $S_d$  – соленость льда, ‰, определяемая по формуле [9]:

$$S_d = S_w (0,2e^{-0,017T} + 0,1), \quad (7)$$

где  $T$  – время, сут, от начала формирования льда до рассматриваемого периода.



**Соколов А. В.**  
руководитель группы  
ООО «Морстройтехнология»

Таблица 1  
Коэффициент  $K$  в зависимости от температуры [6]

$t_a$ , °С	-40	-30	-20	-10	0
$K$ , Дж/(м³·°К)	7,12	6,88	6,67	6,48	6,27



Рис. 1. Пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и индексом намерзания льда

В формуле (5) также обозначено:  $\rho_d$  – плотность соленого льда,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; значение  $\rho_d$  может быть принято по табл. 2 в зависимости от температуры наружной поверхности льда с учетом солёности льда;  $L$  – удельная теплота кристаллизации (плавления) льда, принимаемая равной  $3,35 \cdot 10^5$  Дж/кг.

Из формул (5–7) следует, что для пресного льда при индексе намерзания льда  $R_d = 20$   $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$ , температуре воздуха  $t_a = -8,4$   $^{\circ}\text{C}$  и возрасте льда 58 сут может иметь место ледяной покров с толщиной льда до 16 см.

Необходимо отметить, что после достижения максимума индекса замерзания  $R_d$  и начала оттаивания льда формула (5) больше не применима. Истончение льда является следствием изменения температуры воздуха и тепловых процессов в самом ледяном покрове.

Пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и толщиной льда  $h_d$  приведен на рис. 2.

#### ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ ЛЬДА НА ОСНОВЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В общем случае оценку толщины льда с учетом термического роста предлагается выполнять в следующей очередности:

1. Определяется ГМС Росгидромета, расположенная вблизи места определения толщины льда, с самым длинным и надежным периодом наблюдений. Наиболее предпочтительными являются ГМС с автоматическими измерениями температуры наружного воздуха. Для снижения неопределенностей при статистическом анализе требуются записи с периодом измерения не менее 20 лет.
2. Собираются сведения об исторических среднесуточных температурах воздуха для выбранной ГМС. Эта информация может быть получена из метеорологических ежемесячников или со специализированных сайтов в сети Интернет.
3. Создается электронная таблица для вычисления индекса намерзания льда  $R_d$  по формулам (1–4) для каждой зимы, начиная со времени наступления устойчивых холо-

Таблица 2  
Теплопроводность и плотность пресного льда в зависимости от температуры воздуха [8]

Температура воздуха $t_a$ , $^{\circ}\text{C}$	Теплопроводность льда $\lambda_0$ , Вт/(м $\cdot$ °C)	Плотность льда $\rho_0$ , $\text{кг}/\text{м}^3$
0	2,22	916,2
-5	2,25	917,5
-10	2,30	918,9
-15	2,34	919,4
-20	2,39	919,4
-25	2,45	919,6
-30	2,50	920,0
-35	2,57	920,4
-40	2,63	920,8
-50	2,76	921,6
-60	2,90	922,4



Рис. 2. Пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и толщиной льда

дов. При среднесуточной температуре воздуха выше 0 °С индекс  $R_d$  не накапливается до первого длительного периода низких температур.

4. Определяется наибольшее значение индекса намерзания льда  $R_d$  для каждой зимы.

5. Выполняется статистический анализ полученных индексов намерзания для определения экстремальных значений с заданными периодами повторяемости. Как правило, для целей проектирования требуются сведения об индексах намерзания с периодом повторяемости один раз в 100 лет.

6. По формуле (5) вычисляются толщины льда для периода времени, в течение которого выполнялись натурные наблюдения за толщиной льда.

7. Выполняется сравнение вычисленных толщин льда с замеренными в природе (сведения о натуральных толщинах льда могут быть получены из гидрологических ежегодников Росгидромета, по фондовым данным государственных организаций или частных компаний), а также уточнение коэффициентов формулы (5) в несколько итераций до достижения приемлемой сходимости (3–5 %).

8. Оценивается расчетная толщина льда с заданным периодом повторяемости на основе экстремальных индексов намерзания льда  $R_d$  по формуле (5) с использованием уточненных коэффициентов.

## ВЫВОДЫ

1. Оценки толщины ледяного покрова часто необходимы в расчетах ГТС на замерзающих акваториях, при моделировании ледовых режимов акваторий, разработке мер по сокращению ущерба от заторных и зажорных наводнений, исследовании страховых рисков и др.

2. Несмотря на то что формирование ледяного покрова и его рост является весьма сложным и переменным процессом, оценки толщин ледяного покрова можно с достаточной для инженерных целей точностью выполнять на основе метеорологических данных.

3. Расчетную толщину льда на определенных участках, по возможности, следует сравнивать с данными фактических измерений толщин льда с целью выявления степени соответствия принятых коэффициентов характеристикам физических процессов, влияющих на рост ледяного покрова.

4. Приведенную методику можно считать консерва-

тивной, процессы деградации льда в ней не учитываются, что идет в запас при определении ледовых воздействий на ГТС.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*, Минрегион России, М., 2014.
2. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы): монография / В. А. Бузин, А. Т. Зиновьев. Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. 168 с.
3. Ashton G. D. Thin Ice Growth. Journal of Water Resources Research, 1989. Vol. 25, No. 3. P. 564–566.
4. McGuinness. Modelling Sea Ice Growth. ANZIAM Journal, Vol. 50, Special Issue 03, 2009. P. 306–319.
5. Comfort G., Abdelnour R. Ice Thickness Prediction: A Comparison of Various Practical Approaches. Proceedings 17th CRIPE Workshop on River Ice, Edmonton. 2013. P. 329–342.
6. Гладков М. Г., Шаталова И. Н., Лаппо Д. Д. Современные подходы к расчету нагрузок от льда на гидротехнические сооружения континентального шельфа арктических морей России // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1994, том 228. С. 9–21.
7. Yu Y., Lindsay R. W. Comparison of Thin Ice Thickness Distribution Derived from RADARSAT Geophysical Processor System and Advanced Very High Resolution Radiometer Data Sets. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. C12, 3387, 2003. P. 17–28.
8. Океанографические таблицы, изд. 4-е, переработанное и дополненное, Л.: Гидрометеиздат, 1975. 478 с.
9. Assur A., Weeks W. F. Growth, Structure and Strength of Sea Ice. CRREL Research Report No. 135, 1964.
10. Lepparanta M. A Review of Analytical Models of Sea-Ice Growth. Journal of Atmosphere-Ocean, 1993. Vol. 31(1). P. 123–138.
11. Миронов М. Е., Смирнов В. Н. О выборе параметров ледяного покрова для расчета ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2014. Т. 272. С. 51–58.