

УДК 551.326.7+626

## Оценка толщины льда на основе метеорологических данных

Горгуца Роман Юльевич<sup>1</sup>,  
Мионов Михаил Евгеньевич<sup>2</sup>,  
Соколов Артемий Валерьевич<sup>3</sup>

<sup>1,4</sup>к.т.н., главный инженер, e-mail: rgorgutsa@morproekt.ru

<sup>2</sup>д.т.н., профессор, главный специалист. *Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева* 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21

<sup>3,4</sup>руководитель группы

<sup>4</sup>*Морстройтехнология*

195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21, корпус 2, лит. А

**Аннотация:** К настоящему времени благодаря многолетним усилиям российских и зарубежных ученых, разработаны достаточно достоверные методики расчета ледовых нагрузок и воздействий на сплошные и отдельно стоящие преграды. Для определения толщин льда целесообразно использовать данные Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет), которая ведет многолетние гидрометеорологические наблюдения на водных объектах.

В докладе предлагается инженерная методика расчета толщины льда с учетом данных Росгидромета. Приведены рекомендации и дан алгоритм расчета. Указано на необходимость корреляции толщин льда, полученных расчетным путем, с данными натурных измерений. Рекомендации, изложенные в настоящей работе, могут быть использованы инженерами в практических целях при определении ледовых воздействий на сооружения.

*Ключевые слова:* гидротехнические сооружения, число градусо-дней мороза, толщина льда, расчетные и натурные данные.

## Введение

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 и воздействий на сплошные и отдельно стоящие преграды в составе ГТС [1].

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

Для определения параметров льда с достаточной степенью достоверности натурные наблюдения за ледовой обстановкой в районе строительства должны проводиться не менее 5 лет. При этом измерения основных параметров льда зачастую ведутся на неподвижном припае, а не в период подвижек льда, когда наиболее вероятны наибольшие ледовые воздействия. Также, учитывая темпы строительства и сжатые сроки проектирования, провести необходимое количество натурных наблюдений часто не представляется возможным. В данном докладе предложена инженерная методика расчета толщины льда с учетом гидрометеорологических данных, полученных Росгидрометом.

Росгидромет ведет многолетние гидрометеорологические наблюдения на акваториях водных объектов. По результатам наблюдений регулярно выпускаются режимно-справочные издания (метеорологические ежемесячники и ежегодники, справочники по климату, гидрологические ежегодники и др.) и монографии.

В метеорологических ежемесячниках публикуются данные о максимальных, минимальных и среднесуточных температурах наружного воздуха. В гидрологических ежегодниках приводятся сведения об уровнях, расходах воды и пр.

## Формирование и изменение ледяного покрова

Ледяной покров акваторий образуется в результате различных процессов. Формирование ровного льда происходит в значительной степени под влиянием процессов теплообмена между водой и атмосферой. 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 поверхностью.

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.

Образование и развитие ледяного покрова исследовано в многочисленных работах [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 установившегося температурного режима в ледяном поле расчет толщины льда может быть выполнен с помощью числа градусо-дней мороза  $R$ , °С·сут, определяемого по формуле [6, 7]

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

Здесь  $N$  – число суток в месяцах с отрицательной температурой от начала образования ледяного покрова до рассматриваемого периода;  $t_b$  – температура льда на границе лед–вода, °С, определяемая в зависимости от солености морской воды  $S_w$ , ‰, по формуле [8]

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

$t_{u,i}$  – средняя отрицательная температура льда на границе воздух (или снег)–лед в  $i$ -х сутках, °С, определяемая по формуле [9]

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

В формуле (3)  $t_{a,i}$  – температура воздуха в  $i$ -х сутках, °С, принимаемая по данным измерений на станциях наблюдательной сети (СНС) Росгидромета;  $h_d$  – толщина ледяного поля в предыдущие сутки, м;  $h_s$  – толщина снежного покрова в предыдущие сутки, м, принимаемая по данным измерений на СНС;  $\lambda_d$  и  $\lambda_s$  – теплопроводность льда и снега соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);

$\alpha_t$  – коэффициент теплоотдачи на границе лед–воздух, Вт/(м<sup>2</sup>·°К), определяемый по формуле [9]

$$\alpha_t = K \cdot V_w, \tag{4}$$

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

Таблица 1: Коэффициент  $K$  в зависимости от температуры [9]

$t_a, ^\circ\text{C}$	–40	–30	–20	–10	0
$K, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	7,12	6,88	6,67	6,48	6,27

Отрицательные значения  $R$  отражают собой температуры выше точки замерзания, а положительные – температуры ниже точки замерзания. Нулевое значение  $R$  назначается для даты в конце осени или начале зимы, после которой кривая  $R$  идет вверх. На рис. 1 показан пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и числом градусо-дней мороза  $R$ , найденным по формуле (1).



Рисунок 1: Пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и числом градусо-дней мороза

Искомое значение толщины льда  $h_d$  следует определять по формуле [10, 11]

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

где  $\lambda_d$  – теплопроводность соленого льда, Вт/(м·°С), определяемая по формуле [10]

$$\lambda_d = \lambda_0 + \frac{\beta \cdot S_d}{t_a - 273}. \tag{6}$$

В формуле (6)  $\lambda_0$  – теплопроводность пресного льда, принимаемая в зависимости от температуры воздуха  $t_a$  по табл. 2;  $\beta = 0,13$  Вт/м;  $S_d$  – солёность льда, ‰, определяемая по формуле [11]:

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

В формуле (7)  $T$  – время, сут, от начала формирования льда до рассматриваемого периода.

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

Температура воздуха $t_a, ^\circ\text{C}$	Теплопроводность льда $\lambda_0, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	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

Также в формуле (5)  $L$  – удельная теплота кристаллизации (плавления) льда, принимаемая равной  $3,35 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\rho_d$  – плотность соленого льда,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Значение  $\rho_d$  может быть вычислено в зависимости от температуры воздуха и солёности льда.

Необходимо отметить, что после достижения максимума числом градусо-дней мороза  $R$  и начала оттаивания льда формула (5) больше неприменима. 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.

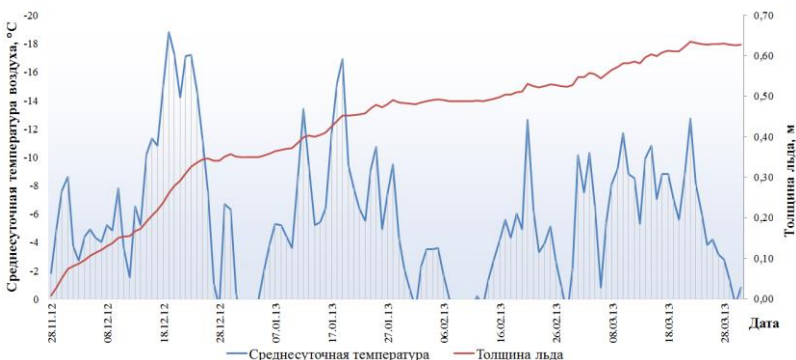


Рисунок 2: Пример взаимосвязи между среднесуточными температурами воздуха и толщиной льда

## Алгоритм определения толщины льда на основе метеорологических данных

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

1. Выбирается станция наблюдательной сети (СНС) Росгидромета, расположенная вблизи места определения толщины льда, с самым длинным и надежным периодом наблюдений. Наиболее предпочтительными являются СНС с автоматическими измерениями температуры наружного воздуха. Для снижения неопределенностей при статистическом анализе требуются записи с периодом измерения не менее 10 лет.

2. Собираются сведения об исторических среднесуточных температурах воздуха для выбранной СНС. Эта информация может быть получена из метеорологических ежемесячников или со специализированных сайтов в сети Интернет.

3. Создается электронная таблица для вычисления числа градусо-дней мороза  $R$  по формулам (1)–(4) для каждой зимы начиная со времени наступления устойчивых холодов. При среднесуточной температуре воздуха выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  число  $R$  не накапливается до первого длительного периода низких температур.

4. Определяется наибольшее значение числа градусо-дней мороза  $R$  для каждой зимы.

5. Выполняется статистический анализ полученных чисел для определения экстремальных значений с заданными периодами повторяемости. Как правило, для целей проектирования требуются сведения о числах градусо-дней мороза  $R$  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 натуре (сведения о натуральных толщинах льда могут быть получены из гидрологических ежегодников Росгидромета, по фондовым данным государственных организаций или частных компаний).

8. Оценивается расчетная толщина льда с заданным периодом повторяемости на основе экстремальных чисел градусо-дней мороза  $R$  по формуле (5).

## Выводы

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

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

3. Приведенную методику можно считать консервативной, процессы деградации льда в ней не учитываются, что идет в запас при определении ледовых нагрузок и воздействий на преграды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[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] Бузин В.А., Зиновьев А.Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы): монография. Барнаул: Пять плюс, 2009. 168 с.

[3] Ashton G.D. Thin Ice Growth. *Journal of Water Resources Research*, **25**, (3), pp. 564–566, 1989.

[4] McGuinness. Modelling Sea Ice Growth. *ANZIAM Journal*, **50** (Special Issue **03**), pp. 306–319, 2009.

[5] Comfort G., Abdelnour R. Ice Thickness Prediction: a Comparison of Various Practical Approaches. *Proceedings 17<sup>th</sup> CRIPE Workshop on River Ice*, pp. 329–342, Edmonton, 2013.

[6] Р 31.3.07-01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. М.: Союзморниипроект, 2001.

[7] ISO 19906:2010. Petroleum and natural gas industries – *Arctic offshore structures*, International Standardization Organization. Geneva, Switzerland, 2010.

[8] Океанографические таблицы: изд. 4-е. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 478 с.

[9] Гладков М.Г., Шаталина И.Н., Лаппо Д.Д. Современные подходы к расчету нагрузок от льда на гидротехнические сооружения континентального шельфа арктических морей России // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1994. Т. 228. С. 9–21,

[10] 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*, **108**(C12, **3387**), pp. 17–28, 2003.

[11] Assur A., Weeks W.F. Growth, Structure and Strength of Sea Ice. *CRREL Research Report*. **135**, 1964.

## Ice Thickness Assessment Based on Meteorological Data

Roman Gorgutsa<sup>1</sup>, Michail Mironov<sup>2</sup>, Artemii Sokolov<sup>3</sup>

<sup>1,4</sup>PhD in Technical Sciences, Chief Engineer,  
e-mail: rgorgutsa@morproekt.ru

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Specialist,  
*B.E. Vedenev All Russia Institute of Hydraulic Engineering.*  
21, Gzhatskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195220

<sup>3,4</sup>Head of a Group

<sup>4</sup>*Morstroytechnologia.*

21/2, liter A, Gzhatskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 195220

**Abstract:** The article proposes an engineering method of ice thickness assessment in view of the above meteorological data. Calculation algorithm is presented. Recommendations about the necessity of detection of correlation between calculated and observed ice thickness values are suggested. In case of significant discrepancy, adjustment recommendations are also given. In requirements document and papers method of ice thickness assessment based on hydrometeorological data has not been described so far. Proposed method provides data comparable with in-situ measurement's values. Given recommendations can be applied for defining ice impacts on hydraulic structures in case of in-situ measurement's data shortage.

*Keywords: hydraulic structure, freezing degree days, ice thickness, in-situ and design value.*