

*И.В. Германов*

**РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА РЕК СЕВЕРА ЕТР НА  
ОСНОВЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*I.V. Germanov*

**CALCULATION OF THE ICE THICKNESS FOR RIVERS OF THE NORTHERN  
PART OF EUROPEAN RUSSIA BASED ON METEOROLOGICAL DATA**

*Ледяной покров — это результат сложных физических процессов и до сих пор нет метода расчета, учитывающего всех факторов, влияющих на его толщину. При отсутствии данных гидрометрических измерений, толщина льда на реках должна быть оценена. В работе рассмотрен метод расчета толщины льда, основанный на уравнении Стефана.*

*Ключевые слова: толщина льда, уравнение Стефана, затор, ледоход, температура воздуха, AFDD.*

*Ice covers result from complex physical processes, there is not yet a method to account for all factors affecting thickness. Given the lack of hydrometric data, ice thickness must be estimated. This report presents a method to calculate ice thickness on the basis of the equation Stephen.*

*Key words: ice thickness, equation Stephen, ice jam, ice run, air temperature, AFDD.*

Вопросы, рассмотренные в работе, нашли практическое применение в диссертационном исследовании автора в области расчетов максимальных заторных уровней воды неизученных рек Севера ЕТР.

Понимание физических процессов, протекающих в речном потоке, несущем ледяной материал, позволяет прогнозировать характер ледохода, его сроки и уровни воды, разрабатывать инженерные решения, позволяющие предотвращать наводнения, вызванные ледовыми явлениями. Заторы льда, являясь основным негативным последствием ледохода, представляют собой скопления льда в русле, стесняющее живое сечение и вызывающие подъем уровня воды в месте его скопления и на некотором участке выше, ведущим иногда к значительным затоплениям территории. Причиной возникновения заторов является неодновременность вскрытия по длине реки и затруднения в транспортировке ледяных включений. Одной из основных причин неодновременности вскрытия больших и средних рек является то, что они пересекают несколько климатических зон, т.к. температурный режим (начало весеннего вскрытия) изменяется по длине реки. А так как большинство рек Севера ЕТР течет с юга на север, это усугубляет процессы заторообразования. Затруднения в транспортировке льда связаны с морфометрическими условиями реки: острова, излучины, сужения, резкий перелом продольного профиля, инженерные сооружения. Таким образом, к числу главных факторов, влияющих на образование и мощность затора, относятся: толщина, прочность и количество льда, морфометрия русла, скорость течения реки,

интенсивность притока воды, температурные условия. Неблагоприятное сочетание данных факторов ведет к возникновению угрозы наводнения или необратимых деформации инженерных сооружений [4].

Расчет толщины ледяного покрова рек — весьма актуальный вид расчетов, потребность в которых в последнее время существенно возросла. Это связано с проектированием автомобильных и железнодорожных дорог, мостовых переходов, дамб, плотин, шлюзов, причалов, водозаборов, защиты прибрежной и береговой линии, а также в связи с освоением северных и восточных районов страны, где автозимники во многих местах являются важнейшими транспортными путями. Заинтересованы в таких расчетах организации, осуществляющие прокладку газо- нефтепроводов и другие работы в русле со льда [1].

Толщина ледяного покрова на реках зависит от комплекса гидрометеорологических условий, которые определяют теплообмен через верхнюю и нижнюю поверхности льда с внешней средой. Наиболее существенное влияние на толщину льда оказывают элементы метеорологического режима — температура воздуха, количество осадков, скорость ветра и такие гидрологические элементы, как скорость течения воды, глубина реки, интенсивность притока подземных вод [4].

Разработкой методов расчета толщины ледяного покрова занимались многие исследователи: Я.Л. Готлиб (1983), Л.Г. Шуляковский (1960, 1969, 1972), В.В. Пиотрович (1968, 1969, 1970), Р.В. Донченко (1971, 1983), Т.В. Одрова (1979), Г. Эштон (1978, 1986), А.И. Пехович (1983), Г.А. Трегуб (1994, 1997), И.Н. Шаталина (1990), В.М. Мишон (1997) и многие другие. К настоящему времени предложено большое количество формул и расчетных приемов для определения толщины ледяного покрова пресноводных водоемов и водотоков, опирающихся на эмпирический и теоретический методы расчета [2].

Эмпирический метод основан на выявлении эмпирических связей толщины льда и отдельных факторов, определяющих изменение толщины ледяного покрова. В этом случае расчетные зависимости получены на основании относительно тесной корреляции между температурой воздуха и толщиной льда. Как правило, они привязаны к конкретному региону.

Теоретический метод базируется на дифференциальных уравнениях, описывающих физическую сущность процесса нарастания толщины льда.

Из-за нестационарности теплового режима снежно-ледяного покрова решение дифференциальных уравнений для определения толщины ледяного покрова не всегда целесообразно использовать на практике, поскольку точность расчетов часто определяется не степенью отображения уравнениями реального процесса, а правильным выбором исходных данных, значение которых определяются приближенно [3]. Поэтому важную роль в ледотермических расчетах играет схематизация реальных тепловых процессов, которые лежат в основе разработанных расчетных методик. При отсутствии данных о характеристиках снежного покрова на поверхности льда, на практике часто применяются эмпирическая формула, полученная на основе решения задачи Стефана [5], вида:

$$h_{ice} = \alpha (AFDD)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $h_{ice}$  — толщина льда, см;  $AFDD$  (accumulated freezing degree days) — сумма средних суточных температур воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на высоте 2 м над уровнем водоема за расчетный период времени;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, определяемый по данным непосредственных наблюдений и отражающий в среднем те условия, которые имели место в период наблюдений (температуру воды, высоту и плотность снежного покрова, глубину водотока, скорость подледного течения воды).

В нормативном документе «Североамериканского Корпуса исследования и разработки инженерно-строительных работ в холодных регионах» (ERDC-CRREL) [5] описывается метод, основанный на формуле (1), для расчетов и прогнозов толщины льда на реках Канады. В нем представлены коэффициенты  $\alpha$  для расчетов толщины льда малых и средних рек, а также озер.

В данной работе используется формула Стефана для расчета толщины ледяного покрова, как одного из основных факторов, влияющих на заторообразование рек Севера ЕТР.

В табл. 1 представлен коэффициент  $\alpha$ , полученный для Севера ЕТР методом обратного пересчета по формуле (1). В общей сложности была использована информация по 62 гидропостам Северного территориального управления по гидрометеорологии.

Таблица 1

**Коэффициент  $\alpha$ , используемый в модифицированном уравнение Стефана, для определения предзаторной толщины льда, см (для Севера ЕТР)**

Условия	Коэффициент $\alpha$
Реки с площадью водосбора 1000–100 000 км <sup>2</sup>	0,8–1,3
Реки с площадью водосбора > 100 000 км <sup>2</sup>	1,4–1,9

Показатели  $FDD$  сначала рассчитываются за каждый день зимнего сезона:

$$FDD = (0^{\circ} - T_a^{\circ}), \quad (2)$$

где  $T_a$  является среднесуточной температурой воздуха в градусах по Цельсию.

В дальнейшем значения  $FDD$  за каждый зимний день суммируются для определения их  $AFDD$ . Нулевая точка  $AFDD$  относится к началу процесса ледообразования, когда кривая суммы меняет отрицательный наклон на положительный. На рис. 1, в качестве примера, представлено отношение среднесуточной температуры воздуха, измеренной на метеостанции Усть-Цильма в зимний период, и  $AFDD$ , рассчитанной для этой станции.

Таким образом, расчет толщины льда рек на основе метеоданных, выглядит следующим образом:

1. Выбирается ближайшая к исследуемому участку реки метеорологическая станция с репрезентативным рядом наблюдений температуры воздуха.
2. Определяется нулевая точка (дата), с которой происходит накопление  $AFDD$  для каждого зимнего сезона.

3. Рассчитывается *AFDD* за рассматриваемый интервал времени.
4. Оценивается средняя толщина льда за каждый год на основе *AFDD*, с использованием формулы (1). Коэффициент  $\alpha$ , используемый в уравнение Стефана, может быть уточнен после сравнения толщины льда с имеющимися измерениями на гидрологических постах.



Рис. 1. Пример отношения среднесуточной температуры воздуха и *AFDD* (метеостанция Усть-Цильма, 2009–2010 гг.).

В качестве примера представлен расчет толщины ледяного покрова перед вскрытием реки Печора в створе Усть-Цильма. Ближайшая метеостанция расположена в селе Усть-Цильма. Имеются данные наблюдений среднесуточных температур воздуха за период 1950–2009 гг. На первом этапе производился расчет *AFDD* за каждый год и был построен хронологический график *AFDD*, представленный на рис. 2. Максимальное значение *AFDD* равно 3277°C (1968 г.). Наименьшее из рассчитанных ежегодных *AFDD* = 1406°C (1994 г.). Среднее значение *AFDD* получилось равным 2131°C.

Далее предполагаем, что коэффициент  $\alpha$  для этой реки в исследуемом створе равен 1,5, как средний для территорий Севера ЕТР. Следовательно, толщину льда можно было бы ожидать в диапазоне от 56 до 86 см, а в среднем 71 см. Надежность коэффициента  $\alpha$  была проверена на материале непосредственных измерений толщины льда на гидрологическом посту в створе «Усть-Цильма». На рис. 3 представлен совмещенный график толщины льда перед вскрытием реки, измеренной в створе поста и рассчитанной по формуле (1) соответственно, за период с 2000 по 2009 г.

При оценке результатов расчета толщины льда допустимая погрешность расчета устанавливается равной 20 % от фактического значения искомой характеристики. На рис. 4 представлен график связи  $h_{\text{расч}} = f(h_{\text{измер}})$ , где для  $h_{\text{расч}}$  определен диапазон допустимой погрешности. Метод считается эффективным, если его обеспеченность составляет не менее 80 %.

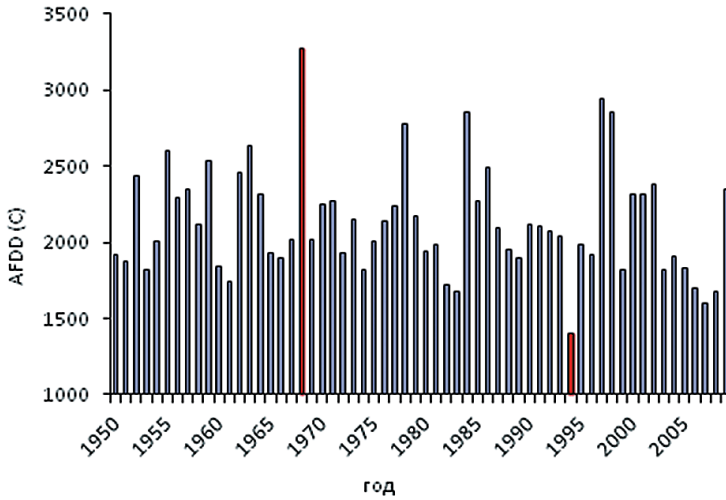


Рис. 2. Хронологический график *AFDD* для р. Печора — с. Усть-Цильма, метеостанция Усть-Цильма.



Рис. 3. Совмещенный график измеренной и рассчитанной толщины льда на дату вскрытия р. Печора — с. Усть-Цильма.

Результаты расчетов толщины льда для р. Печора — с. Усть-Цильма, представленные в табл. 2, свидетельствуют о достаточной эффективности используемого метода.

Средняя многолетняя толщина льда перед вскрытием реки Печоры в створе поста Усть-Цильма за период с 2000 по 2009 г. равна 67 см. На основе наблюдения за толщиной льда и с учетом снежного покрова и наледи в створе измерения, коэффициент  $\alpha$  равный 1,5 описывает наблюдаемую толщину льда и будет считаться целесообразным для дальнейших расчетов и прогнозов.

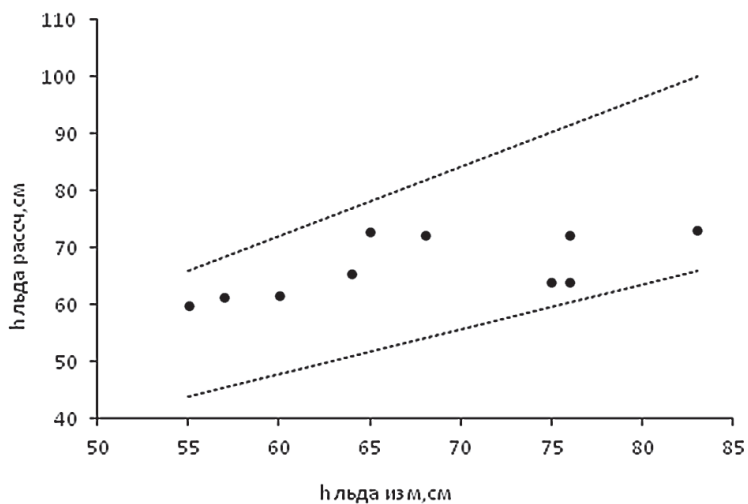


Рис. 4. График связи  $h_{расч} = f(h_{измер})$ .

Таблица 2

**Оценка результатов расчета толщины льда по формуле (1) для р. Печора — с. Усть-Цильма**

Год	Измеренная толщина льда, см	Рассчитанная толщина льда по формуле (1), см	Абсолютная ошибка расчета, см	Относительная ошибка расчета, %
2000	68	72	4	6,2
2001	76	72	-4	5,0
2002	83	73	-10	11,7
2003	76	64	-12	15,8
2004	64	66	2	2,5
2005	75	64	-11	14,6
2006	60	62	2	2,9
2007	55	60	5	9,1
2008	57	62	5	7,9
2009	65	73	8	11,9
среднее значение	68	67	-1	8,8

**Заключение**

Расчеты толщины ледяного покрова необходимы для гидравлического анализа участков рек, подверженных заторообразованию, а также при проектировании мостов, автодорог или гидротехнических сооружений. Несмотря на сложный и изменчивый характер процессов формирования ледяного покрова, толщина льда может быть

рассчитана по метеорологическим данным. Формулу Стефана можно использовать не только для расчета толщины льда малых и средних, но и больших рек. Всякий раз, когда это возможно, расчетная толщина льда должна быть проверена на фактическом материале наблюдений для обоснованности коэффициентов  $\alpha$ .

### ***Литература***

1. *Барышников Н.Б., Пагин А.О., Соболев М.В.* Гидрологические риски при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 17, с. 18–22.
2. *Козлов Д.В.* Лед пресноводных водоемов и водотоков. — М.: Издательство МГУП, 2000. — 262 с.
3. *Чижов А.Н.* Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 128 с.
4. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — 60 с.
5. USACE (2002) Engineering and Design: Ice Engineering. U.S. Army Corps of Engineers Engineer Manual 1110-2-1612.