

3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

А.Л. Чикин, Л.Г. Чикина

Аннотация. Рассмотрены известные формулы расчета толщины льда разными методиками, основанными на решении уравнения Стефана. Предложенная методика расчета, адаптированная для Таганрогского залива, воду которого можно считать пресной, дополняет ранее известные и позволяет проводить расчет как при ветре, так и при штилевой погоде. Приводится сравнение результатов расчета по разным методикам с наблюдаемыми данными в период с 2010 по 2013 г.

Ключевые слова: пресноводный водоем, ледообразование, математическая модель

Географическое положение, мелководность Азовского моря и большая изменчивость атмосферной циркуляции над акваторией обуславливают высокую пространственно-временную изменчивость ледового режима. Это определяет актуальность исследований динамики ледяного покрова, являющихся важным этапом в разработке методов оперативного краткосрочного прогноза ледовых условий Азовского моря. Ледяной покров является важным компонентом гидрологического режима Азовского моря, замерзающего в зимний сезон частично, а в экстремально суровые зимы – полностью. Морские льды существенно усложняют судоходство, рыбный промысел и представляют реальную опасность для гидротехнических сооружений. Первостепенная роль в образовании льда принадлежит атмосферным процессам, их сезонным и межгодовым особенностям. В данной работе выполнено исследование изменений толщины льда в Азовском море в зависимости от ветровой ситуации.

Для исследования динамики ледообразования в Таганрогском заливе положены ежедневные гидрометеорологические наблюдения на береговой научно-экспедиционной базе Южного научного центра РАН «Кагальник» на побережье Таганрогского залива (с. Кагальник Азовского р-на Ростовской обл.).

Большинство методов расчета толщины льда основано на решении уравнения Стефана $a \cdot \frac{d\xi}{dt} = \chi \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\xi} - \Phi$, где $\xi(t)$ – толщина льда, м, в момент времени t , с; $T(z, t)$ – температура, °С, в момент времени t горизонтального слоя ледяной толщи, расположенного на z метров ниже уровня моря; $\chi = -\lambda / (l \cdot \rho_l)$, $\Phi = R / (l \cdot \rho_l)$; λ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м · К); a – коэффициент температуропроводности, м²/с; ρ – плотность льда, кг/м³; l – скрытая теплота ледообразования, 1/с; R – поток тепла от воды ко льду, Вт/м². Поток тепла из толщи льда в атмосферу $\chi \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\xi}$ в общем случае рассчитывается

из уравнения теплопроводности. Однако используется предположение о линейности профиля изменения температуры в толще льда, т.е. полагается $\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_3 - T_{\lambda}}{\xi}$, где T_3 – температура замерзания (т.е. температура на нижнем слое толщи льда), °С; T_{λ} – температура на границе раздела лед – воздух (температура подстилающей поверхности), °С. В частности, на этом предположении основаны методы из работ [Эфроимсон, 1975; Третьяков, 2008].

Если воспользоваться методом, изложенным в работе [Эфроимсон, 1975], то для расчета толщины льда получим формулу следующего вида:

$$\xi = -\left(\frac{\lambda_{\lambda}}{\lambda_{\text{ол}}} h_{\text{ол}} + \frac{\lambda_{\lambda}}{Av}\right) + \sqrt{\left(\frac{\lambda_{\lambda}}{\lambda_{\text{ол}}} h_{\text{ол}} + \frac{\lambda_{\lambda}}{Av} + \xi_0\right)^2 + 2\kappa \sum (-T_a)}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\lambda} = 9,2 \cdot 10^5$ Вт/(м · К), $\lambda_{\text{ол}} = 2 \cdot 10^5$ Вт/(м · К) – теплопроводности льда и снега; T_a – среднесуточная температура воздуха, °С; v – скорость ветра, м/с; $h_{\text{ол}}$ – высота снежного покрова, м; ξ , ξ_0 – толщина льда и начальная на данный промежуток времени толщина льда, м; κ – коэффициент, зависящий от теплофизических характеристик льда и принятый равным $0,57 \cdot 10^{-4}$; $A = 41,1$ – коэффициент пропорциональности. Однако данная формула перестает работать при штилевой погоде, когда скорость ветра равна нулю.

Методика в работе [Донченко, 1987] позволяет проводить расчеты без учета силы ветра:

$$\xi = -h_{\text{ол}} \frac{\lambda_{\lambda}}{\lambda_{\text{ол}}} + \sqrt{\left(h_{\text{ол}} \frac{\lambda_{\lambda}}{\lambda_{\text{ол}}} + \xi_0\right)^2 + \frac{2\lambda_{\lambda}}{L\rho_{\text{ол}}} T_{\lambda} \Delta t}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ол}}$ – плотность снежного покрова, кг/м³; L – удельная теплота фазового превращения, Дж/кг. Температура поверхности рассчитывается по связи между температурой поверхности льда или снега и температурой воздуха $T_{\lambda} = \alpha T_{\text{в}}$. При анализе теплообменных процессов в период нарастания толщины ледяного покрова установлено [Чижов, 1975], что коэффициент α изменяется от десятых долей и до 1,5 в зависимости от толщины льда, толщины слоя снега на льду и физических параметров снега и льда.

При расчете толщины льда в восточной части Таганрогского залива, воду которого можно считать пресной, использовалась как формула (1), которая учитывает ветер, так и формула (2) при штиле. Непосредственное использование формул (1) давало заниженное значение толщины льда. Это происходило, скорее всего, из-за увеличенного значения коэффициента пропорциональности A . По этой причине пришлось значение коэффициента A скорректировать по наблюдаемым данным на БНЭБ «Кагальник».

Были проведены расчеты в периоды с 15.12.2009 по 22.01.2010, с 11.01.2011 по 12.03.2011 и с 17.12.2012 по 10.01.2013. На рисунках 1–3 показано изменение толщины льда в зависимости от температуры воздуха в указанные периоды.

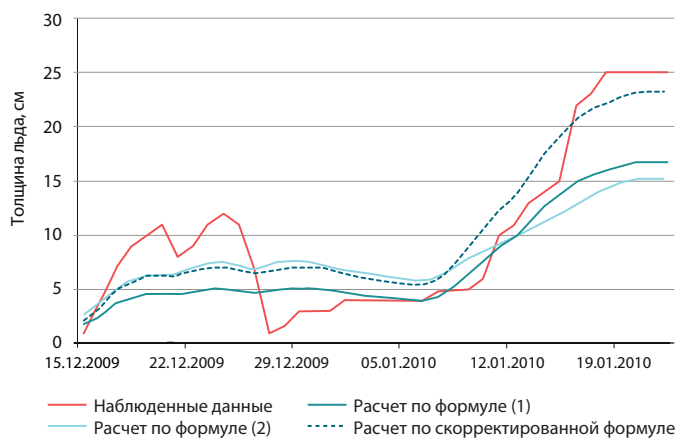


Рис. 1. Изменение толщины льда в период с 15.12.2009 по 22.01.2010

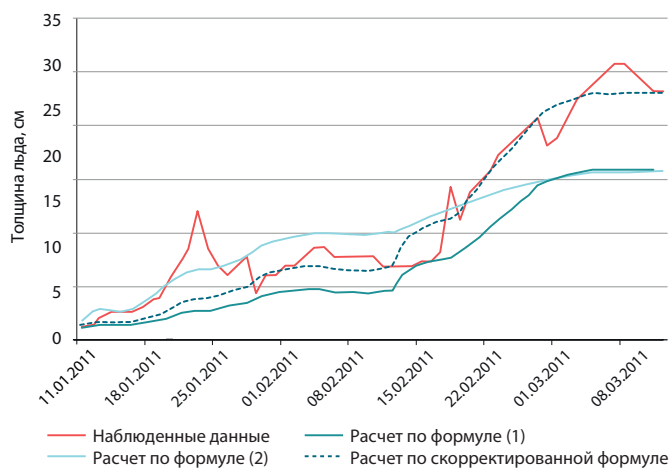


Рис. 2. Изменение толщины льда в период с 11.01.2011 по 12.03.2011

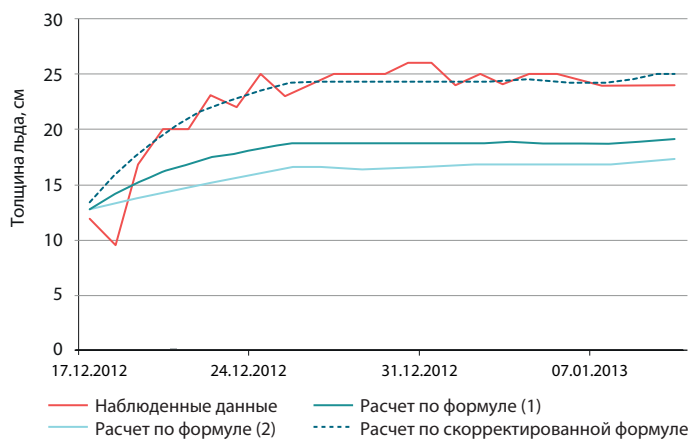


Рис. 3. Изменение толщины льда в период с 17.12.2012 по 10.01.2013

В таблице 1 приведены относительные погрешности расчета изменения толщины льда по различным методикам на БНЭБ «Кагальник».

Таблица 1. Относительные погрешности расчета по различным методикам, (%)

Период	Расчет по скорректированной формуле	Расчет по формуле (1)	Расчет по формуле (2)
15.12.2009–22.01.2010	24,4	35,7	40,2
11.01.2011–12.03.2011	17,5	36,3	30,7
17.12.2012–10.01.2013	6,8	23,3	31,4

Из приведенной таблицы видно, что расчет по скорректированным формулам в условиях Таганрогского залива дает намного лучший результат по сравнению с формулами (1) и (2). Это позволяет утверждать, что предложенная методика достаточно адекватно описывает процесс изменения толщины льда в Таганрогском заливе.

Проводя анализ колебаний климата юга России, и в частности ледовитости Азовского моря, можно сделать вывод о возможности прогнозирования поведения ледостава в данном регионе, а данный подход может быть использован и в более полной модели ледообразования, учитывающей еще и дрейф льда.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5. Расчеты выполнены на кластере ЦКП «Высокопроизводительные вычисления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
- Третьяков М.В. К моделированию гидрологических процессов в эстуариях с ледовым покровом // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2 (вып. 79). С. 67–74.
- Чижов А.Н. О механизме формирования заторов льда и их типизация // Труды ГГИ. 1975. Вып. 227. С. 3–17.
- Эфроимсон В.О. Упрощенный метод расчета нарастания льда в Азовском море // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 161. С. 117–125.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Чикин Алексей Львович** – д.ф.-м.н., гл.н.с. ЮНЦ РАН; chikin@sfedu.ru
- Чикина Любовь Григорьевна** – д.ф.-м.н., проф., Южный федеральный университет; lchikina@sfedu.ru