

## Математическое моделирование термобара и течений в водоемах в период таяния ледового покрова

Н.С. Блохина\*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2  
(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)*

В работе с помощью математического моделирования исследуются особенности развития термобара в пресных водоемах в период таяния ледового покрова. Показано, что аномальное свойство воды (максимум плотности при температуре  $4^\circ\text{C}$ ) при заданных гидрометеорологических условиях приводит к двум гидродинамическим эффектам, противоположным образом влияющих на перемещение термобара. С одной стороны у берега формируется термобар, который перемещается к центру водоема, а с другой стороны у кромки льда зарождается вихрь, замедляющий этот процесс.

PACS: 92.40. Су

УДК: 532.517: 51-73:556

Ключевые слова: математическое моделирование, термобар, температура максимальной плотности, конвекция, ледовый покров.

В период весеннего прогрева или осеннего охлаждения в пресных и слабосоленых водоемах формируется термобар (ТБ) — зона фронтального раздела с температурой  $4^\circ\text{C}$  (в пресных водоемах) от поверхности до дна, где сходятся прибрежные и глубинные воды.  $4^\circ\text{C}$  — это температура, при которой вода имеет максимальную плотность. Достигая этой температуры, поверхностные воды становятся наиболее плотными и опускаются ко дну водоема, формируя термобар. Ограничивая обмен между прибрежными и глубинными водами, термобар оказывает огромное влияние на формирование тепловых, динамических процессов в водоеме, его экологическое состояние. Именно из-за этого явления происходит скапливание различного рода загрязнений в прибрежной области водоемов, что приводит к ухудшению состояния водного объекта весной и осенью. В связи с этим, изучение динамики развития термобара в водоемах имеет огромное значение для понимания термогидродинамических процессов в них, и как следствие, может внести свой вклад в усовершенствование методов устранения загрязнения в водных объектах.

Явление термобара развивается в водоемах при разных гидрометеорологических условиях. Особый интерес представляет исследование формирования термобара в водоемах еще полностью не освободившихся ото льда, так как такая ситуация типична весной в озерах северных широт. Настоящая работа посвящается изучению особенностей развития термобара и течений в водоеме в период таяния ледового покрова и является продолжением исследований [1–3].

Рассматриваются термогидродинамические процессы в водоеме с наклонным дном глубиной  $H = 50$  м и длиной  $L = 750$  м (половина водоема). Движение в нем описывается нелинейной системой уравнений Навье–

Стокса в приближении Буссинеска, уравнением теплопроводности и уравнением состояния пресной воды, учитывающим наличие максимума плотности в районе  $4^\circ\text{C}$ . Подробный вывод системы уравнений дан в работах [4, 5]. Центральная часть водоема покрыта льдом толщиной  $H_i = 1$  см и длиной  $L_i = 50$  м. Процесс его таяния описывается уравнением баланса льда. Верхняя граница льда нагревается за счет потока тепла от солнца  $Q_R = 450 \text{ Вт/м}^2$ , а остужается за счет длинноволнового излучения. К его нижней и правой кромкам поступают потоки тепла от воды. На границе раздела вода–атмосфера задается радиационный поток  $Q_R$ . Вычисляются длинноволновое излучение (охлаждающее водную поверхность), потоки явного и скрытого тепла, которые в зависимости от метеорологических условий могут, как нагревать, так и охлаждать поверхность водоема.

Задача решается численно с использованием конечно–разностных методов.

Расчеты для водоема (рис. 1) свободного ото льда (а) и частично им покрытого (б) (в начальный момент времени) показали, что через 8.5 часов его прогрева месторасположение термобара в этих двух случаях остается одинаковым. Распределение изотерм во всей области, включая центральную часть схоже. Отличие лишь в их наклоне. Ближе к центру водоема (случай б) наблюдается значительный градиент температуры по горизонтали. В этом случае внутри антициклонического вихря, охватывающего водоем от центра до термобара, в его центральной области существует интенсивный глубинный вихрь (ИГВ), зародившийся у кромки льда. По мере прогрева водоема в случае (а) термобар постепенно перемещался к его центру и исчезал при достижении температуры воды больше  $4^\circ\text{C}$ .

В случае (б) картина развития термобара и формирования течений в водоеме отлична от этой ситуации и зависит от интенсивности и размера ИГВ. Наблюдается несколько стадий перемещения термобара:

\*E-mail: [blokhinans@gmail.com](mailto:blokhinans@gmail.com)

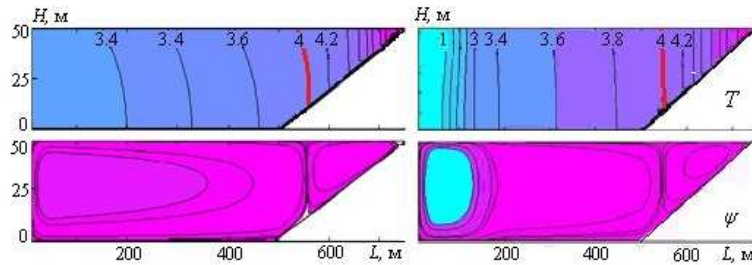


Рис. 1: Поля распределения температуры ( $T$ ) и функции тока ( $\psi$ ) для случая водоема свободного ото льда (а) и частично им покрытого (б) через 8.5 часов после начала прогрева водоема и зарождения термобара у берега. Цифры на рисунках обозначают температуру в  $^{\circ}\text{C}$

1. распространение ТБ к центру водоема;
2. остановка ТБ и его перемещение к берегу;
3. снова перемещение ТБ к центру водоема.

Наши оценки показали, что термобар проходит весь водоем от места расположения, представленного на рис. 1 в случае (а) примерно за 5.5 суток, а в случае (б) — за 9.5 суток. Образовавшийся у кромки льда интенсивный глубинный вихрь почти в два раза увеличивает время существования ТБ в водоеме.

Такое развитие ТБ в период таяния льда весной объясняется наличием у воды максимума плотности при температуре  $4^{\circ}\text{C}$ . От  $0^{\circ}\text{C}$  до  $4^{\circ}\text{C}$  плотность воды увеличивается, а от  $4^{\circ}\text{C}$  до  $8^{\circ}\text{C}$  уменьшается по одинаковому закону. Однако изменение плотности воды (от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $8^{\circ}\text{C}$ ) происходит тем значительней, чем дальше значение ее температуры от  $4^{\circ}\text{C}$ .

Прогрев водоема приводит к тому, что поверхностные воды становятся теплее. Справа от кромки льда вплоть до ТБ в последующие моменты времени в одних и тех же местах температура воды увеличивается, но еще не достигает  $4^{\circ}\text{C}$ . При этом, чем выше температура воды (до  $4^{\circ}\text{C}$ ), тем больше ее плотность. Это приводит к опусканию поверхностной воды ко дну, что увеличивает интенсивность и размер ИГВ. Прибрежные поверхностные воды также нагреваются, но с увеличением температуры (от  $4^{\circ}\text{C}$ ) плотность воды уменьшается. Интенсивность прибрежного вихря увеличивается медленнее, чем глубинного. После таяния льда вся поверхность воды слева от термобара начинает прогреваться, что способствует еще большему уве-

личению интенсивности конвективного вихря слева от ТБ. Этот вихрь «запирает» и даже вытесняет прибрежную циркуляцию к берегу. Ситуация меняется, когда в результате прогрева водоема в прибрежной области формируются более неустойчивые слои жидкости, чем в глубинной. Прибрежный вихрь начинает увеличиваться в размере, постепенно захватывая глубинные воды, что изменяет направление движения термобара. Термическое состояние водоема забывает свое первоначальное состояние и дальнейшее распространение термобара соответствует ситуации (а), когда лед первоначально отсутствовал в водоеме.

Проведенные исследования показали, что развитие термобара и течений в пресных водоемах весной существенным образом зависит от ледовой обстановки. Наличие у воды температуры, при которой ее плотность максимальна, приводит к двум гидродинамическим эффектам. С одной стороны наблюдается усиление прибрежной циркуляции из-за прогрева прибрежных вод до температуры  $4^{\circ}\text{C}$  и перемещение термобара от берега. С другой стороны это же аномальное свойство воды способствует формированию интенсивного глубинного вихря около кромки льда и его усилению по мере прогрева водоема и таяния льда. Это приводит к торможению перемещения термобара к центру водоема и даже к изменению направления его движения, что ослабляет интенсивность перемешивания прибрежных вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-05-00822, 15-01-6363).

- [1] Блохина Н. С., Орданович А. Е. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 1. С. 113. (2012). (Mosc. Univ. Phys. Bull. 2012. **67**, N 1. P. 109).
- [2] Блохина Н. С. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 4. С. 59. (2013). (Mosc. Univ. Phys. Bull. 2013. **68**, N 4. P. 324).
- [3] Блохина Н. С. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 4. С. 102. (2015). (Mosc. Univ. Phys. Bull. 2015. **70**,

N 4. P. 319).

- [4] Блохина Н. С., Орданович А. Е., Савельева О. С. Водные ресурсы. **28**, № 2. С. 224. (2001).
- [5] Блохина Н. С., Овчинникова А. В., Орданович А. Е. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 2. С. 60. (2002).

**Mathematical modeling of a thermal bar and flows in reservoirs during ice cover melting****N. S. Blokhina**

*Department of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics,  
M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: [ablokhinans@gmail.com](mailto:ablokhinans@gmail.com)*

Features of a thermal bar development in fresh water reservoir during ice cover melting are investigated using mathematical modelling. It is shown that the anomalous feature of water (maximum density at 4 °C) at given hydrometeorological conditions leads to two hydrodynamic effects which have opposite influence on the thermal bar movement. On the one side the thermal bar is formed near the shore and moves to the center of the reservoir, and on the other side vortex is arisen near the ice edge slowing down this process.

PACS: 92.40. Cy

Keywords: mathematical modeling, thermal bar, temperature of maximum density, convection, ice cover.

Received 25.04.2016.

**Сведения об авторах**

Блохина Наталия Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: [blokhinans@gmail.com](mailto:blokhinans@gmail.com).