

УДК 551.465

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА ДИНАМИКУ РАЗВИТИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО БАРА

© 2010 г. Д. А. Соловьев¹, Н. С. Блохина²¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

e-mail: solovev@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 26.03.2009 г.

На основе экспериментов в лабораторном бассейне исследована динамика развития термического бара с учетом воздействия ветра на водную поверхность. Приведены оценки времени существования и скорости перемещения термического бара под действием ветра различной силы и направления. Проводится сравнение полученных результатов с данными численного моделирования.

ВВЕДЕНИЕ

К числу явлений, знание закономерностей развития которых необходимо для построения общей теории взаимодействия океана и атмосферы, а также прогноза термического и динамического режимов озер и водохранилищ, относится фронтальное перемешивание вод с образованием фронтального раздела — термического бара (термобара). Термический бар формируется в пресных и солоноватых водоемах ($S \leq 24.7 \text{ ‰}$) средних широт в период освобождения их от ледяного покрова либо его образования [7]. В весенний период под действием солнечного излучения происходит интенсивный прогрев прибрежной области водоема. Поверхностные воды достигают температуры максимальной плотности, близкой к 4°C . Возникает неустойчивость плотностной стратификации, вызывающая конвективное перемешивание и приводящая к формированию термобара, разделяющего водоем на две области с разными термическими и динамическими свойствами. Аналогичная ситуация также имеет место в период осеннего охлаждения водоема.

На корреляцию ветровой циркуляции с динамикой развития термобара неоднократно обращалось внимание [4, 7, 8, 11]. Однако конвективное движение воды, связанное с возникновением и развитием термобара в водоемах с точки зрения взаимосвязи с ветровым воздействием, до настоящего времени практически не исследовалось в лабораторных условиях [2, 3, 9, 10]. Изучение термогидродинамических, возникающих под воздействием ветра и плотностной неустойчивости, представляется актуальным для понимания механизмов, ответственных за перераспределение водных масс, которое в значительной мере определяет экологическое состояние всего водоема.

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов возникновения и динамики развития тер-

мического бара с учетом воздействия ветра на водную поверхность методами лабораторного моделирования.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Лабораторная установка схематически показана на рис. 1. Она представляет собой прямоугольный бассейн из стекла длиной $l = 1.5$ м и шириной $s = 0.4$ м. Дно бассейна в продольном направлении имеет наклон, угол α которого можно изменять в пределах от 0° до 15° . Заливаемая в бассейн вода, при фиксированном наклоне дна, образовывала клин. Для предотвращения теплоотдачи дно и стенки бассейна изолировались пенопластом. Поток тепла Q на водную поверхность в диапазоне $(40\text{--}210)$ Вт/м² создавался 5-ю электрическими лампами ИКЗ-250. Для измерения потока тепла использовался цифровой люксметр, позволяющий получать значения потока с точностью до 2%. Температура воды измерялась с помощью четырех вертикальных зондов с закрепленными на них полупроводниковыми интегральными микросхемами К1019ЕМ1 (датчиками температуры) и регистрировалась платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Тарированные термодатчики соединялись с персональным компьютером, в котором накапливались временные ряды массивов значений температуры в различных точках водной среды. Отдельный датчик был установлен над поверхностью воды для регистрации температуры воздуха.

Абсолютная погрешность измерения температуры составляла не более 0.15°C . Параллельно с измерением температуры проводилась видеосъемка циркуляционных движений в воде. Скорости циркуляционных движений определялись по трекам взвеси мельчайших частиц растворенного в воде марганцево-кислого калия.

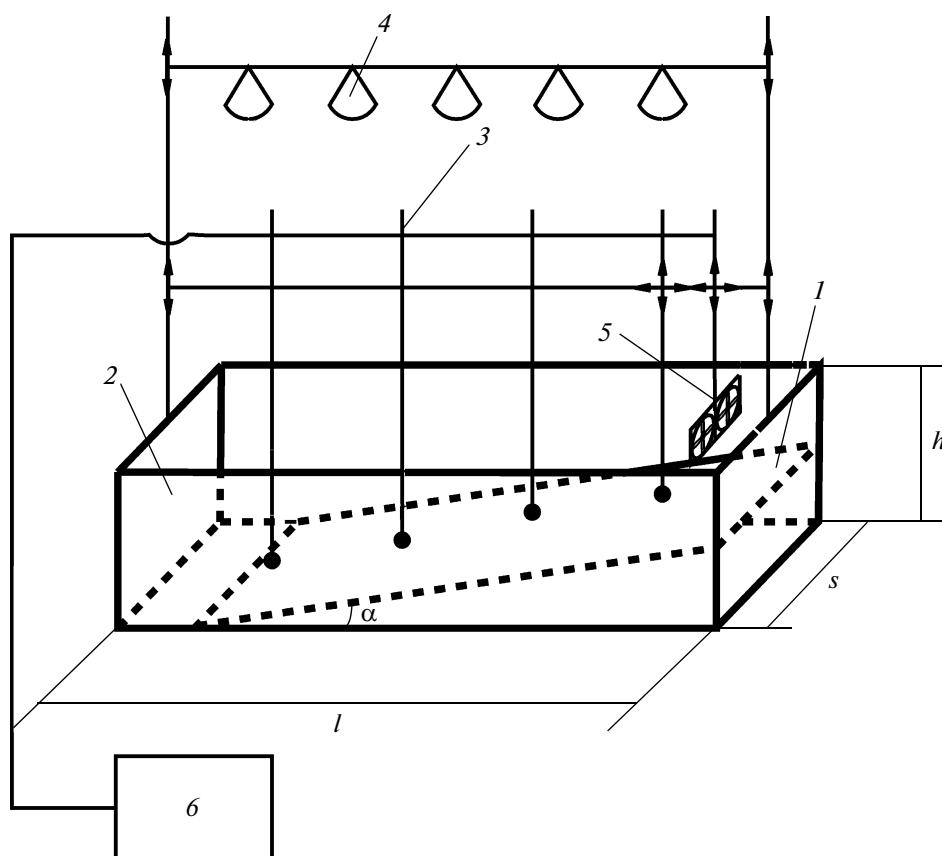


Рис. 1. Схема лабораторной установки.

l – длина основания бассейна, α – угол наклона дна, s – ширина бассейна, h – глубина бассейна, 1 – наклонное дно (клин), 2 – прозрачная наблюдательная стенка, 3 – вертикальные зонды с термодатчиками, 4 – электролампы накаливания, 5 – ветропродуктор, 6 – АЦП.

Для создания ветровой циркуляции в лабораторном бассейне использовался ветропродуктор (рис. 1). Он состоял из двух вентиляторов диаметром 0.12 м электрической мощностью 5 Вт каждый. Вентиляторы закреплялись на металлической поворотной раме, позволяющей изменять их взаимное расположение и углы наклона осей вращения. Ветропродуктор устанавливался на опорном штативе, в заданном положении над лабораторным бассейном. Скорость потока воздуха, создаваемого вентиляторами, измерялась электронным анемометром в пределах от 0 до 5 м/с с погрешностью, не превышающей 0.05 м/с.

В лабораторных экспериментах угол наклона дна бассейна к горизонту устанавливался на значении 6° , а глубина воды в бассейне была 0.16 м. Поток радиации в лабораторном эксперименте составлял 210 Вт/м^2 и незначительно отличался от типичных его значений в природных условиях весной [11]. Основное количество теплоты от ламп накаливания в лабораторном бассейне поглощалось верхним сантиметровым слоем воды. При соответствующих пропорциях по вертикали лабораторного и реального водоема в модели создавалась имитация поглощения солнечного тепла в верхних нескольких метрах озера.

При проведении экспериментов высота подвеса электроламп от поверхности воды составляла 0.9 м, расстояния устанавливались: между электролампами – 0.25 м; между двумя соседними вертикальными зондами с термодатчиками – от 0.01 до 0.3 м; между термодатчиками на вертикальном зонде – от 0.01 до 0.05 м. Количество термодатчиков на одном зонде варьировалось от 2 до 4.

Перед началом каждого опыта бассейн наполнялся водопроводной водой и льдом, по мере таяния которого температура воды понижалась до величины $T_0 < T_m$ ($T_m = 4^\circ\text{C}$). Для выравнивания температурных неоднородностей вода в бассейне перемешивалась, а перед началом прогрева несколько минут отстаивалась. Измерения проводились на продольном разрезе, проходящем по середине бассейна. Ветер включался через 33 мин после начала прогрева бассейна. Поток воздуха, создаваемый ветропродуктором, был направлен параллельно водной поверхности. Ветровое воздействие ориентировалось в двухкоординатных направлениях вдоль свободной поверхности воды в водоеме (рис. 2а и 2б). Измерения проводились при скоростях ветра 1.5, 2.0, 4.0 и 4.5 м/с.

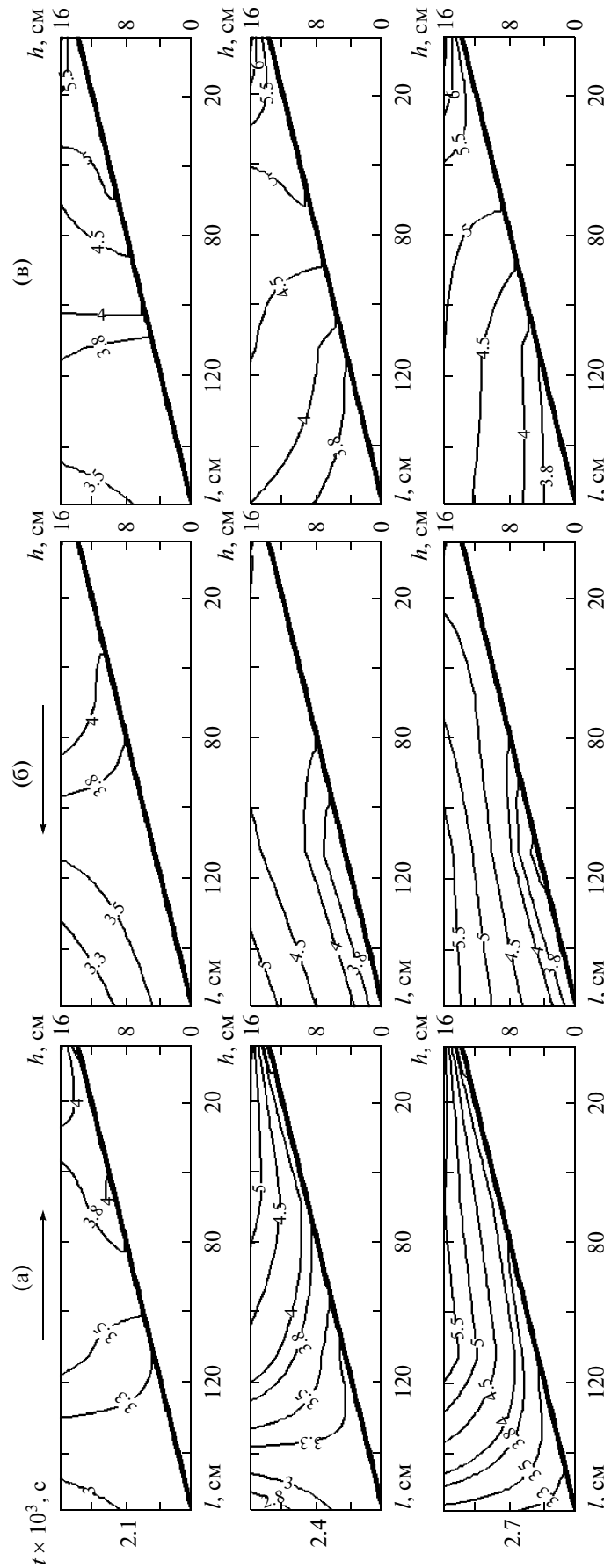


Рис. 2. Динамика изменения термической структуры водной среды в лабораторном бассейне (шаг по времени $\Delta t = 0.3 \times 10^3$ с) при скорости ветра 1.5 м/с. (а) – ветер направлен к мелководной части бассейна, (б) – ветер направлен к глубоководной части бассейна, (в) – ветер отсутствует.

В работе сравниваются результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования термогидродинамических процессов в водоеме с заданными параметрами лабораторной установки при ветровом воздействии на поверхность воды. Для этого использовалась разработанная авторами математическая модель, основанная на двухмерной системе уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска с учетом нелинейной зависимости плотности воды от температуры в районе 4°C [1]. Воздействие ветра на водную поверхность учитывалось в граничных условиях для скоростей течения. Ранее эта модель верифицировалась по данным лабораторного эксперимента в отсутствие ветрового воздействия. Использовалась неявная разностная схема. Шаги по времени, пространству и количество узлов расчетной сетки подбирались исходя из условия устойчивости по фон Нейману и равнялись 0.01 с, 0.003 м, и 9381 соответственно. Используемая численная модель более подробно описана в работе [1].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ динамики изменения термической структуры водной среды в лабораторном бассейне при наличии в нем фронтального раздела и слабой ветровой циркуляции (скорость ветра до 2 м/с), показал следующее.

В первые 2 минуты (рис. 2, $t = 2.1 \times 10^3$ с) после начала ветрового воздействия на водную поверхность как в направлении берега (рис. 2а), так и обратном направлении (рис. 2б), в мелководной (теплой) и глубоководной (холодной) областях бассейна температура поверхностных вод понижалась. При этом термобар смещался на меньшее расстояние от берега по сравнению со случаем отсутствия ветрового воздействия – случай (в) (рис. 2в). Одной из причин, приводящей к снижению температуры поверхностных вод, является увеличение скрытого потока тепла Q_L . Как видно из формулы $Q_L = -LC_q(q - q_{air})$ [5], этот поток увеличивается линейным образом с увеличением скорости ветра V и разности удельной влажности воздуха q_{air} на высоте измерения скорости ветра и вблизи поверхности воды q (здесь L – удельная теплота парообразования, C_q – коэффициента Дальтона). К сожалению, точно оценить этот поток в период проведения эксперимента невозможно, так как значение C_q в этой формуле соответствует измерению скорости ветра на высоте 2 м от поверхности воды. В нашем случае ветропродуктор находился на высоте 0.02 м. Второй из причин, приводящей к понижению температуры поверхностных вод, является перемещение водных масс, вызванное дрейфовым течением.

В случае (а) (рис. 2а), холодные воды из глубоководной части бассейна по поверхности перемещались к берегу. С одной стороны, у берега они прогре-

вались за счет потока тепла от ламп, а с – этот прогрев уменьшался за счет увеличения скрытого потока тепла. Вследствие этого прибрежные воды медленнее достигали температуры максимальной плотности. При этом, в отличие от случая отсутствия ветрового воздействия, термобар смещался к берегу и прибрежная область циркуляции охватывала значительно меньший объем бассейна.

В случае (б) (рис. 2б) испарение так же уменьшало температуру поверхностных вод по всей акватории бассейна. Однако постоянный нагон теплых прибрежных вод в глубоководную часть бассейна замедлял процесс охлаждения воды, что способствовало более быстрому продвижению термобара и развитию прибрежной циркуляции по сравнению со случаем (а). Наблюдалось небольшое смещение зоны схождения конвективных циркуляций от четырехградусной изотермы в сторону меньших температур.

К моменту времени $t = 2.4 \times 10^3$ сек (рис. 2) ветровое воздействие, направленное к берегу (случай а), продолжает замедлять распространение термобара. Наблюдается значительный прогрев прибрежных вод. Изотерма 4°C существенно изменяет свой наклон, так что в прибрежной области бассейна устанавливается устойчивая плотностная стратификация – более теплые, но легкие воды лежат над слоем воды с температурой близкой к 4°C . Два конвективных вихря, наблюдаемые в момент времени $t = 2.1 \times 10^3$ с по трекам взвеси мельчайших частиц растворенного в воде марганцево-кислого калия продолжают развиваться. Они разделяются водами с температурой близкой к 4°C . При этом прибрежная циркуляция, вращаясь в сторону противоположную направлению ветра, охватывает большую часть бассейна. В случае (б), нагон теплых прибрежных вод приводит к более быстрому прохождению и заглублению изотермы 4°C . Бассейн охвачен одним вихрем с опусканием воды в центре и подъемом вдоль дна в направлении берега. Однако составляющая силы тяжести на дне бассейна направлена в сторону противоположную направлению вращения вихря, что замедляет перемещение придонных холодных вод к берегу и способствует значительному прогреву прибрежной области.

В момент времени 2.7×10^3 с (рис. 2) ветровое воздействие в случае (а) привело к дальнейшему замедленному распространению термобара. При этом как в случае (а), так и в случае (б) в бассейне наблюдалась единая циркуляция с опусканием воды у стенки глубокой части бассейна. Интенсивность циркуляций уменьшилась и в большей части бассейна устанавливалась устойчивая температурная стратификация.

Анализ данных измерений показал, что при скорости ветра $V = 1.5$ м/с повышение уровня воды у наветренного берега было незначительно, что не позволяло развиваться градиентному течению. Дрейфовое течение еще не подавляет плотностную

неустойчивость водных масс, а лишь изменяет структуру течений и расположение термобара.

При скоростях ветра, больших 2 м/с, его воздействие на водную поверхность приводит к усилению дрейфового течения и возникновению подповерхностного градиентного противотечения. Через 5–10 мин после подключения в эксперименте ветра в бассейне происходит подавление плотностной неустойчивости и наблюдается охват водоема единой циркуляционной ячейкой, вращающейся в направлении действия ветра. Наблюдается заметный наклон изотерм в наветренную сторону. При этом на фоне подавления плотностной неустойчивости наблюдается полное перемешивание вод в бассейне и выравнивание температуры по всей его длине. При скорости ветра 4.5 м/с (в случаях (а) и (б)) начинается быстрое (через 1.5–2 мин после подключения ветра) перемешивание водных масс с полным разрушением термобара. Единая ветровая циркуляционная ячейка, вращающаяся в сторону действия ветра, становится хорошо заметной по следам трассеров. Эта циркуляция включала в себя как горизонтальные, так и вертикальные движения жидкости, причем последние наиболее ярко выражены у поперечных стенок бассейна.

Ветровое воздействие на водную поверхность бассейна в период существования и развития в нем термобара оказывает существенное влияние на скорость его перемещения. На рис. 3 представлена скорость C перемещения изотермы 4°C по данным лабораторного и численного эксперимента. Наблюдается их удовлетворительное согласие.

Отметим, что в приповерхностной области бассейна наклон изотермы 4°C определяется, главным образом, скоростью, направлением, временем воздействия ветра, а также глубиной места. При этом изотерма 4°C может испытывать смещение в ту или иную сторону вблизи поверхности воды, либо полностью исчезать из приповерхностной области бассейна. Очевидно, что, исчезнув с поверхности из-за ветрового нагона, термобар все-таки может существовать ниже поверхности воды, продолжая смещаться к центру бассейна. Эта особенность, возникающая вследствие ветрового воздействия, учитывалась при определении скорости C . Значение скорости продвижения термобара определялось по перемещению относительно берега точки пересечения изотермы 4°C с линией, проходящей на глубине середины бассейна в данном месте. Таким образом определялась скорость перемещения изотермы 4°C в центральной области бассейна, которая отличалась от ее значений в верхних и нижних слоях воды. Аналогичным образом определялась скорость C при численном моделировании.

На рис. 3 видно, что под действием слабоинтенсивного ветра ($V = 1.5$ м/с) скорость смещения термического бара уменьшается в среднем на 10% в случае направления ветра от берега. При ветре, направ-

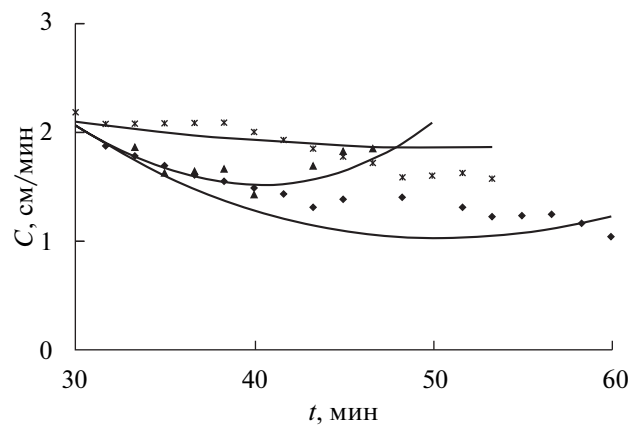


Рис. 3. Скорость C смещения термического бара в лабораторном бассейне по результатам эксперимента (точки) и численных расчетов по математической модели [1] (линии).

a – ветер направлен к мелководной части бассейна ($V = 1.5$ м/с), b – ветер направлен к глубоководной части бассейна ($V = 1.5$ м/с), $в$ – без ветра.

ленным в противоположную сторону (случай а), наблюдалось уменьшение скорости C примерно на 30%. При этом время существования четырехградусной изотермы на поверхности воды в бассейне уменьшается (до 15%) под действием ветра, направленного от берега, и увеличивается (до 20%) при ветре в направлении мелководья, что указывает на зависимость адвекции тепла между теплой и холодной областью от направления ветра.

Приведенные данные об уменьшении времени существования термического бара в случае (б) не противоречат наблюдениям за скоростью его перемещения. Это объясняется следующим образом. Так как при длительном воздействии ветра в направлении глубоководной части бассейна четырехградусная изотерма имеет значительный наклон в этом направлении, то, несмотря на меньшее значение скорости его смещения в центральной области бассейна, термобар исчезал с поверхности быстрее за счет значительного наклона изотермы 4°C в наветренную сторону (рис. 2б).

Сравнивать результаты настоящей работы с данными натурных наблюдений [6, 7] можно лишь качественно, с учетом оценки соответствующих безразмерных критериев гидродинамического подобия. В работе [7] отмечено, что при скорости ветра 5.2 м/с термобар еще существовал, хотя в лабораторном эксперименте при скоростях ветра, больших 2 м/с, он полностью подавлялся дрейфовым течением. Здесь необходимо учесть, что значение числа Рейнольдса для лабораторного бассейна примерно в 2.5 раза меньше его значения для озера средних размеров. Как видно из лабораторного эксперимента (рис. 2), ветер, направленный от берега при скоростях, меньших 2 м/с, не разрушал термобар, а способствовал более быстрому прогреву лабораторного

водоема, особенно в глубоководной его части [6]. Этот результат не противоречит данным натуральных наблюдений.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных лабораторных экспериментов выявлена изменяющаяся со временем циркуляционная структура течений при различных скоростях ветра. Для лабораторной модели водоема установлен интервал критических значений скоростей ветра, при которых дрейфовое течение формирует зону конвергенции водных масс, не совпадающую с изотермой 4°C, подавляет плотностную конвекцию, не давая возможности зародиться термическому бару. Обнаружено ускоренное прохождение изотермы 4°C по поверхности воды под действием слабоинтенсивного ветра со стороны берега и замедленное ее движение при ветре в направлении мелководья, несмотря на замедленное перемещение этой изотермы в центральной области бассейна в обоих случаях. Полученный результат указывает на нелинейную зависимость адвекции тепла между теплой и холодной областями водоема от направления и интенсивности ветра. Все полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными расчетов численной модели авторов [1] с заданными параметрами лабораторной установки.

Проделанные лабораторные эксперименты показали применимость созданной установки для воспроизведения характерных особенностей термической структуры водоема при переходе температуры воды через температуру максимальной плотности с учетом ветрового воздействия. Возможность варьировать в ходе эксперимента начальные и граничные условия открывает перспективы для дальнейших исследований термогидродинамических процессов в лабораторных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-05-64911-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блохина Н.С., Соловьев Д.А.* Влияние ветра на динамику развития термобара в период весеннего прогрева водоема // Вестн. МГУ. 2006. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 3. С. 59–63.
2. *Гриценко В.А., Демченко Н.Ю., Руденко А.И. и др.* Лабораторное, численное и натурное исследование тонкой структуры стоковых фронтов в прибрежной Балтике // Физические проблемы экологии. 2004. № 12. С. 12–23.
3. *Зилитинкевич С.С., Крейман К.Д.* Теоретическое и лабораторное исследование термического бара // Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 5. С. 750–755.
4. *Зубов Н.Н., Сабинин К.Л.* Вычисление уплотнения при смешении морских вод. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 58 с.
5. *Монин А.С., Обухов А.Н.* Основы закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофизического института АН СССР. 1954. № 24. (151). С. 163–187.
6. *Тихомиров А.И.* Некоторые особенности термического режима Якимварского залива // Комплексные исследования шхерной части Ладожского озера. М.: Изда-во АН СССР. 1961. Т. XII. С. 79–110.
7. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
8. *Штокман В.Б.* Избранные труды по физике моря. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 336 с.
9. *Demchenko N., Chubarenko I.* Coastal cooling/heating events: Laboratory experiments // Acta Geophysica. 2007. V. 55, Issue 1. March, P. 56–64.
10. *Elliott G. H.* A laboratory and mathematical study of the thermal bar // PhD thesis, Institute of Oceanography, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1970. P. 189.
11. *Rodgers G.K.* Heat advection within Lake Ontario in spring and surface water transparency associated with the thermal bar. // Proc. 11th Conf. Great Lakes Res. Internal. 1968. P. 480–486.

LABORATORY INVESTIGATION OF WIND FORCING INFLUENCE ON THE THERMAL BAR EVOLUTION

© 2010 D. A. Solovev, N. S. Blokhina

The experiments carried out in laboratory conditions allow us for the first time to investigate the dynamic of the thermal bar development taking into account wind forcing at the water surface of a laboratory tank. Influence of wind of different strength and direction on life time and motion speed of the thermal bar has been evaluated. The results were compared with numerical modeling.